

Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE,
AMBIENTALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE



Tesi di laurea magistrale in Ingegneria Civile

**INFLUENZA DEI PROCESSI DI MESCOLOMENTO SULLA
STIMA DEI TEMPI DI RICAMBIO MEDIANTE UN
MODELLO BASATO SUL PRISMA DI MAREA**

RELATORE: PROFF. ANDREA DEFINA

CORRELATORE: DOTT. DANIELE PIETRO VIERO

LAUREANDA: ELISA BORTOLOTTO

ANNO ACCADEMICO 2014-2015

Indice

1	Introduzione	1
2	Basi teoriche per l'applicazione del modello	5
2.1	Introduzione	5
2.2	Tempo di residenza e Tempo di ricambio	8
2.3	Modello basato sul prisma di marea	10
2.3.1	Versione classica del modello	11
2.3.2	Modello modificato	13
3	La laguna di Venezia: inquadramento morfologico e ambientale	17
3.1	Origine ed evoluzione di una laguna	17
3.2	La laguna di Venezia	19
3.2.1	Evoluzione storica della laguna di Venezia	20
3.2.2	Morfologia	21
3.2.3	Flora e fauna	25
3.3	Evoluzione morfologica	28
3.4	Inquinamento	32
4	Il modello idrodinamico	35
4.1	Introduzione	35
4.2	Dominio di calcolo: file.geo	37
4.3	Condizioni al contorno e istruzioni di calcolo:file.sim	42
4.4	Risultati:file.out	45
5	Applicazione del modello alla laguna di Venezia	47
5.1	Modello applicato	47
5.2	Tempo di ricambio locale: Incidenze	48
5.3	Portate di soluto	50

5.4	Tempo di ricambio globale	51
5.4.1	Fattore di ritorno b	54
5.4.2	Fattore di mescolamento ξ	56
5.4.3	Considerazioni sui parametri b e ξ	61
5.4.4	Confronto tra b calcolati e valori di letteratura	64
5.4.5	Modifica delle condizioni iniziali	66
6	Conclusioni	69
	Bibliografia	71

Capitolo 1

Introduzione

Le zone costiere, e in generale gli ambienti marini, fin dai tempi antichi, sono aree di grande interesse, per l'importanza che esse hanno in relazione alla vita dell'uomo. In particolare, le aree costiere sono interessate da elevata densità abitativa, sono sede di attività portuali e industriali, di attività di pesca ed acquacoltura e di attività turistiche. Le esigenze contrastanti di tali attività devono inoltre permettere una fruizione senza rischi delle aree marine costiere per attività di diporto e di tempo libero e spesso tutto ciò è in contrasto con le esigenze di conservazione del loro valore naturalistico, paesaggistico, storico ed artistico.

Per una corretta realizzazione di politiche di conservazione biologica, di gestione e recupero ambientale è necessaria l'identificazione di situazioni di riferimento, e la descrizione della loro evoluzione nel tempo e nello spazio, per confrontare la situazione attuale o gli obiettivi di ripristino imposti dalla legislazione.

L'importanza di tale obiettivo è riconosciuta nell'ambito scientifico internazionale e recepita da disposizioni legislative. In particolare la direttiva europea 2000/60/CE prevede che siano effettuate analisi delle caratteristiche dei diversi corpi d'acqua e che siano definite delle condizioni di riferimento tipiche, specifiche per ognuno di essi. Gli elementi da considerare per le acque costiere e le acque di transizione, per raggiungere tali obiettivi, includono la composizione e le abbondanze delle popolazioni biologiche (p.es. abbondanze planctoniche), i parametri chimico-fisici (p.es. temperatura, salinità, nutrienti) e le condizioni morfologiche (p.es. superfici, profondità).

Escluse le variabili morfologiche, che possiedono strumenti propri di indagine del suolo, gli altri elementi sono studiati attraverso l'analisi della qualità delle acque, che si serve di modelli numerici.

Per la stima della qualità delle acque in bacini naturali e per la valutazione di eventuali interventi volti a migliorare il ricambio idrico, i modelli di qualità delle acque sono utili strumenti. Per poter formulare dei giudizi sulla qualità delle acque e proporre degli interventi di miglioramento, è comodo far riferimento a degli indicatori, in particolare ad indicatori idrodinamici, che hanno il vantaggio di essere rapidi e semplici da calcolare, ed è inoltre possibile, sulla base dell'esperienza e delle conoscenze specifiche, immaginare quali possano essere gli interventi più idonei per modificare i valori assunti da questi indicatori. Tra gli indicatori proposti in letteratura, quelli più frequentemente utilizzati come indice della qualità delle acque, o meglio, della capacità di un sistema idraulico ad auto-rinnovare le proprie acque sono alcuni tempi-scala caratteristici.

Il tempo scala che viene analizzato nel seguente lavoro è quello chiamato, nella letteratura internazionale, "flushing time", qui reso come tempo di ricambio. Lo studio di questo tempo caratteristico è importante nell'analisi di sostanze inquinanti in ambienti marini ed è definito come il tempo richiesto per rimpiazzare l'acqua inquinata (o "vecchia") accumulata in un bacino con acqua pulita, proveniente dal mare. Per calcolarlo vengono impiegati dei modelli numerici che tengono conto di come l'acqua del bacino progressivamente fuoriesca, considerando l'effetto dei flussi e riflussi della marea.

L'importanza del tempo di ricambio, oltre che per la valutazione della tossicità di un bacino, è fondamentale anche negli studi riguardanti sostanze non tossiche, per la valutazione della qualità delle acque.

Ad esempio, il rischio della de-ossigenazione dell'acqua in un bacino costiero dipende soprattutto dall'entità del mescolamento delle acque interne con quelle provenienti dal mare. Di conseguenza, il rischio di eutrofizzazione provocato dalla de-ossigenazione dell'acqua si riduce se gli organismi planctonici sono rapidamente rimossi dal bacino, cioè se c'è un buon ricambio d'acqua.

Poter determinare il tempo di ricambio risulta essere molto importante al fine di stimare il ricambio idrico. Uno dei metodi più largamente utilizzati è il cosiddetto modello basato sul prisma di marea, un semplice modello concettuale che fornisce una stima del tempo di ricambio globale, dell'intero bacino, in funzione di alcuni semplici parametri. D'altra parte, questo modello concettuale è derivato in ipotesi di distribuzione uniforme della concentrazione all'interno del bacino considerato, ipotesi, questa, non sempre verificata. Nel seguente lavoro si cercherà di confrontare l'approccio generalmente adottato in letteratura, che utilizza l'i-

potesi di mescolamento perfetto, con un modello modificato che rimuove questa semplificazione.

Il lavoro si suddivide in diverse parti. In particolare, nel capitolo 2 sono trattati in maniera generale alcuni tempi scala, con particolare attenzione al sul tempo di ricambio. Sono inoltre descritte le equazioni utilizzate nella versione base del modello basato sul prisma di marea e le modifiche introdotte nella versione migliorata. Visto che l' applicazione dei diversi modelli riguarda la laguna di Venezia, nel capitolo 3 si illustra la zona oggetto di studio nelle sue peculiarità.

Nel capitolo 4 si descrivono gli strumenti matematici utilizzati per lo studio del tempo di ricambio e nel capitolo 5 si discutono i modelli applicati alla Laguna di Venezia, le simulazioni effettuate e i risultati ottenuti. Nel capitolo 6, infine, si traggono le conclusioni del lavoro.

Capitolo 2

Basi teoriche per l'applicazione del modello

In questo capitolo verranno introdotti alcuni dei più comuni tempi scala (come per esempio il tempo di residenza o l'età dell'acqua) che vengono utilizzati per poter caratterizzare in qualche modo la capacità di un bacino di rinnovare le proprie acque. E' infatti interessante conoscere la loro distribuzione spaziale, o il loro valore mediato spazialmente, sotto determinate condizioni idrodinamiche o climatiche.

Tuttavia, sebbene nel caso di moto puramente convettivo, in un dominio avente sezione di ingresso ed uscita distinte, la loro definizione sia chiara, nel caso in cui il tipo di moto o le condizioni al contorno sono diverse questa potrebbe essere ambigua: molto spesso, infatti, sono oggetto di confusi usi ed errate applicazioni, ed è bene quindi specificare in che modo sono stati utilizzati nel seguente lavoro. Verrà inoltre descritto il modello teorico per la stima del tempo di ricambio globale basato sul prisma di marea e come il miglioramento dello stesso mediante l'introduzione di un parametro che tiene conto dei processi di mescolamento

2.1 Introduzione

Consideriamo il caso più semplice di un moto puramente convettivo, assumendo cioè trascurabili i processi diffusivi, in un dominio avente una sezione in ingresso e una sezione in uscita, ben distinte, come rappresentato in figura 2.1.

Il *tempo di residenza* è definito come il tempo necessario ad una particella per raggiungere la sezione di uscita ([12] Zimmerman, 1976), mentre l'*età dell'acqua* è

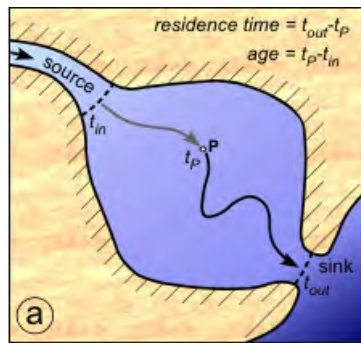


Figura 2.1: Tempo di residenza ed età dell'acqua.

il tempo necessario per una particella per raggiungere, dalla sezione di ingresso, una determinata posizione.

Come è intuitivo capire, i due concetti di tempo di residenza e di età dell'acqua sono così complementari: se l'età è piccola il tempo di residenza è grande e viceversa, cioè, più il punto P è lontano dall'uscita, più è grande il tempo di residenza e piccola l'età. La somma di questi due tempi definisce il *tempo di transito*. La definizione di tempo di transito può sembrare poco utile ma in realtà è comoda. Ad esempio, se si considera come sorgente un punto qualsiasi del dominio e non una particolare sezione in ingresso, il tempo di transito è il tempo che la particella d'acqua iniettata spende per coprire la distanza dal punto in cui la particella è stata immessa alla sezione in uscita o, in altre parole, il "transit time" per ogni punto P nel dominio.

Queste definizioni sono chiare finché il moto è puramente convettivo, ma si complicano quando il moto è governato anche dalla diffusione.

Se si inietta istantaneamente una massa di tracciante in P, ciò che si vedrà uscire dalla sezione in uscita è una nuvola di tracciante, che esce gradualmente e non in un preciso istante, per effetto della diffusione. Si può quindi estendere la definizione di tempo di residenza, in presenza di diffusione, come il tempo necessario affinché tutto il tracciante esca dal dominio oppure come il tempo trascorso tra l'immissione e la fuoriuscita del "baricentro" della massa di tracciante, che può essere inteso come la fuoriuscita di una predeterminata frazione della massa iniettata.

La prima definizione è più rigorosa ma al tempo stesso meno significativa perché parte del tracciante potrebbe finire per diffusione in zone morte del dominio e il tempo per la fuoriuscita di tutto il tracciante potrebbe crescere enormemente,

risultando appunto non significativo.

Con riferimento all'età, nel caso in cui non vi sia diffusione, è imposta nulla nel momento in cui dell'acqua entra nel dominio attraverso la sorgente e , mentre si propaga verso P , invecchia ma al tempo stesso si mescola con acqua caratterizzata da una diversa età. Nel caso in cui ci sia diffusione, si fa riferimento all'età di una particella d'acqua non puntuale, ma considerando un suo intorno, avente quindi le caratteristiche che sono la media di quelle delle particelle che lo occupano, istante per istante, e, in funzione di queste, l'età può quindi aumentare ma anche ridursi. Si consideri ora un moto dominato dalla diffusione, nel quale che il trasporto convettivo sia trascurabilmente piccolo. E' questo il caso degli ambienti a marea, nei quali la sezione di ingresso coincide con la sezione di uscita.

Se si inietta istantaneamente una massa di tracciante in P si vedrà uscire una nuvola di tracciante attraverso la sezione in uscita. In questo caso particolare, a maggior ragione, non ha senso parlare di "baricentro" della macchia ed ha senso invece utilizzare una definizione di tempo di residenza basata sul tempo necessario affinché esca dalla laguna una frazione significativa di tracciante. Lo stesso ragionamento vale per l'età dell'acqua nel punto P : l'acqua che entra dal mare, lungo il tragitto compreso tra la sorgente e il punto P , si mescola con il tracciante presente in laguna per effetto della diffusione.

Queste considerazioni riguardo alla diffusione, in cui sorgente e pozzo si confondono, valgono per esempio per la laguna di Venezia (vedi figura 2.2), nella quale l'apporto di acque dolci da parte dei fiumi che sfociano all'interno è poco significativo rispetto allo scambio che avviene attraverso le bocche.

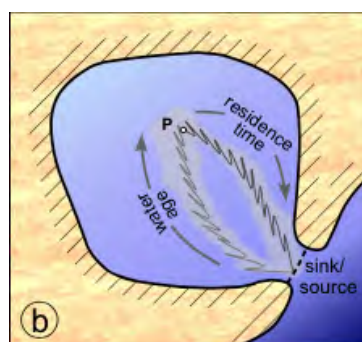


Figura 2.2: Schema di funzionamento di una laguna

Le bocche di porto sono, alternativamente, "source" e "sink" a seconda della fase di flusso e riflusso, quindi anche il concetto di età e di tempo di residenza risultano

meno chiari e si potrebbe pensare che, dal punto di vista quantitativo, possano assumere valori confrontabili in quanto l'età dell'acqua è il tempo impiegato dalle particelle d'acqua a percorrere il tragitto dalla bocca al generico punto interno al bacino e il tempo di residenza è il tempo impiegato dalle particelle d'acqua a percorrere lo stesso tragitto anche se in direzione opposta.

Queste definizioni, inoltre, sono "locali" ma potrebbero essere d'interesse anche definizioni "globali", cioè non riferite a un particolare punto P, ma estese a tutto il bacino, quindi mediando i valori su esso, come accade nel nostro caso.

2.2 Tempo di residenza e Tempo di ricambio

Il tempo di residenza è definito come il tempo impiegato da un tracciante, iniettato all'interno di un dominio d'interesse, a raggiungere la sezione in uscita. ([1] *Bolin and Rodhe*, 1973; [12] *Zimmerman*, 1976; [10] *Takeoka*, 1984).

In presenza di diffusione, si preferisce definire il tempo di residenza in un generico punto all'interno di un bacino come il tempo necessario affinché una prefissata frazione della massa di tracciante iniettata in questo punto esca dal bacino stesso. Per valutarlo numericamente viene utilizzata la relazione matematica data da Takeoka([10]), nota come "remnant function".

Si considera il rilascio istantaneo di un tracciante al tempo $t = 0$, cosicché la distribuzione del tracciante nel bacino sia pari a c_0 .

La "remnant function" $r(x, y, t)$ della concentrazione, funzione dello spazio e del tempo, è data da:

$$r(x, t) = \frac{\bar{c}(x, t)}{\bar{c}_0(x, t)} \quad (2.1)$$

dove \bar{c} è la concentrazione media nel bacino, mentre \bar{c}_0 è la concentrazione media per $t = 0$. Da qui si ottiene il tempo di residenza medio del tracciante dato da:

$$T_r(x) = \int_0^{\infty} r(x, t) dt \quad (2.2)$$

Da un punto di vista operativo, l'equazione 2.2 implica che, per valutare il tempo di residenza, è necessario seguire il comportamento del tracciante nel bacino per un tempo estremamente lungo, per la precisione infinito. Questa cosa ovviamente non ha senso.

Per determinare allora il tempo di residenza si considera nella "remnant function" la concentrazione media mediata sul periodo della marea $\langle \bar{c}(x, t) \rangle$ invece della

concentrazione media sul bacino $\bar{c}(x, t)$; questo non ha alcuna influenza sull'eq. 2.2.

E' stato dimostrato che approssimando il decadimento della $\langle \bar{c}(x, t) \rangle$ nel bacino come quello della laguna di Venezia con una legge di tipo esponenziale, la "remnant function" può essere così definita come:

$$r(x, t) = \frac{\langle \bar{c}(x, t) \rangle}{\bar{c}_0(x, t)} = \exp\left(-\frac{t}{T_r(x)}\right) \quad (2.3)$$

Quando $t = T_r$ l'eq. 2.3 diventa:

$$\frac{\langle \bar{c}(x, t) \rangle}{\bar{c}_0(x, t)} = \frac{1}{e}$$

quindi il tempo di residenza è quel tempo per cui $\frac{\langle \bar{c}(x, t) \rangle}{\bar{c}_0(x, t)}$ decade fino al limite di $\frac{1}{e}$, pari a circa 0.37.

Si precisa qui che il tempo di residenza misura il tempo che impiega una particella a lasciare il dominio in considerazione per la prima volta, che è diverso dal tempo di esposizione che invece considera anche il fatto che, per vari fattori idrodinamici o esterni, la particella possa anche ritornare all'interno del dominio e uscirne in un secondo o successivo momento (vedi figura 2.3, dove t_1 è il tempo di residenza mentre $t_1 + (t_3 - t_2)$ è il tempo di esposizione).

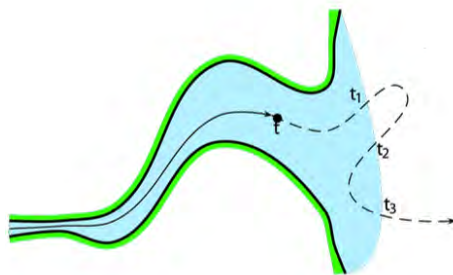


Figura 2.3: Differenza tra tempo di esposizione e di residenza

Il tempo di ricambio fornisce informazioni generali circa le capacità di scambio di un bacino; esso è definito, nel caso di moti dominati dalla diffusione, come l' "e-folding flushing time", che tradotto in italiano potrebbe essere "tempo di ricambio fino alla soglia $1/e$ della concentrazione", ovvero il tempo necessario per rimpiazzare la frazione $(1 - 1/e)$ dell'iniziale acqua del bacino con della nuova. Praticamente, esso descrive la capacità dell'acqua "nuova" proveniente dall'esterno

del bacino di arrivare a sostituire quella “vecchia” presente nel bacino fino alla soglia $1/e$.

Da un punto di vista computazionale, data una concentrazione iniziale di tracciante

$$c(x, t = 0) = 1$$

nel bacino (inteso come dominio di calcolo), e una pari a zero per la zona esterna del bacino, seguendo l'andamento della concentrazione nel tempo, il tempo di ricambio (globale) viene calcolato come il tempo affinché la concentrazione media del tracciante nel bacino, e mediata sul ciclo di marea, decada fino alla soglia $1/e$. Questa definizione globale del parametro può essere ricondotta ad una definizione locale del tempo di ricambio se si considera invece la concentrazione locale (cioè in un dato punto del bacino) mediata sulla marea $\langle c(x, t) \rangle$ che decresce fino alla consueta soglia.

Bisogna fare attenzione che sebbene la media spaziale del tempo di ricambio locale $T_f(x)$ sia un'approssimazione accettabile del tempo di residenza ([11] *Viero, Defina*), $T_f(x)$ non è il tempo di residenza.

Per moto puramente convettivo, $T_f(x)$ corrisponde esattamente all'età dell'acqua, che come già visto è complementare al tempo di residenza. D'altra parte, è prassi ricorrente in letteratura assegnare al tempo di ricambio globale il nome di “tempo di residenza”.

2.3 Modello basato sul prisma di marea

Il tempo di residenza, come altri parametri, è stato da sempre utilizzato come indicatore della qualità delle acque in un sistema, come può essere un estuario o un bacino a marea. Questo tempo scala permette di stimare la capacità di ricambio di un sistema, in modo da poter trarre in qualche modo delle conclusioni circa la diffusione di inquinanti, il trasporto dei sedimenti o altri processi ecologici.

Data la difficoltà nel misurare il tempo di residenza, la sua stima è stata affidata ad appropriati modelli, in particolare al modello basato sul *prisma di marea*.

Il meccanismo principale che permette ad un bacino non troppo grande di ricambiare le proprie acque con quelle esterne è il regolare comportamento della marea astronomica.

Altri fattori che possono influire nel ricambio delle acque possono essere il vento, con la generazione di correnti secondarie e la pressione atmosferica, che con l'au-

mento o diminuzione del livello che genera una marea di tipo meteorologico. A differenza della marea astronomica, l'azione del vento è tutto fuorchè prevedibile o regolare quindi è preferibile considerare le condizioni più restrittive per caratterizzare l'efficienza di ricambio di una laguna, ovvero la sola azione della marea astronomica.

Il ricambio dovuto alla marea è il risultato dallo scambio ripetuto di un volume detto prisma di marea, tra il bacino (laguna di Venezia in questo caso) e il corpo idrico ricevente (Mar Adriatico) attraverso una o più aperture (le bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia). L'acqua che entra nel fase di flusso della marea riempie il prisma di marea fino a raggiungere il livello massimo; questa "nuova acqua" si mescola con quella esistente nel bacino. Durante la fase di riflusso, il prisma di marea esce dal bacino con le correnti di ritorno.

La capacità di ricambio della marea non dipende solamente dalla geometria del bacino preso in esame o dall'ampiezza dell'onda di marea, ma anche dalla porzione di acqua che una volta uscita ritorna nel bacino, frazione detta "return flow factor", ovvero tradotto come fattore di ritorno.

I modelli basati su questo meccanismo vengono chiamati "tidal prism flushing models", ovvero *modelli di ricambio basati sul prisma di marea*.

Data la loro estrema semplicità e le ipotesi semplificative di cui necessitano, l'uso di questi tipi di modelli determina l'insorgenza di alcuni problemi nel loro utilizzo, soprattutto nel caso in cui il mescolamento all'interno del bacino non sia completo, nella determinazione della loro formulazione e del fattore di ritorno.

2.3.1 Versione classica del modello

Il modello basato sul prisma di marea, come presentato e trattato per es. da *Sanford et al.* ([9]) e comunemente utilizzato in letteratura introduce delle significative semplificazioni: suppone che il bacino studiato sia sufficientemente piccolo e che le correnti in gioco siano tali da garantire il perfetto mescolamento all'interno dello stesso.

Un'altra importante assunzione sta nel fatto che il corpo idrico che riceve le correnti di riflusso del bacino sia in grado di "diluire" l'acqua uscente in un tempo più lungo della fase della marea: questo ci assicura che l'acqua uscente di fatto non vada ad influire sulle capacità del corpo idrico ricevente nei vari cicli di marea.

Si ipotizza di lavorare con un bacino di forma qualsiasi, avente volume medio V , superficie A , e profondità media H , collegato col corpo idrico esterno più grande da

un canale (bocca) di sezione definita. La differenza di volume nel bacino nel caso di alta marea e bassa marea è il prisma di marea $P = AR$, dove R è l'ampiezza media di marea, il cui periodo è T .

Il fattore di ritorno è definito come la frazione di acqua che, uscita del bacino durante la fase di riflusso, ritorna all'interno del bacino stesso nella successiva fase di flusso.

L'espressione ottenuta per il tempo di ricambio (che in questa formulazione viene chiamato anche tempo di residenza) è:

$$T_f = \frac{VT}{(1-b)P} \quad (2.4)$$

ottenuta supponendo che la concentrazione esterna al bacino a $t = 0$ sia nulla e che il tracciante presente nel bacino sia conservativo.

Nel lavoro di *Sandford et al.* ([9]), per determinare il fattore di ritorno, vengono considerati una serie di casi che tengono conto della relazione che sussiste tra la fase di marea entrante/uscente attraverso il canale di collegamento rispetto alla corrente esterna, e la loro relativa intensità, e la capacità di mescolamento dell'acqua uscita dal bacino col quella del dominio esterno; ovvero viene indagato il comportamento del prisma di mare una volta uscito dal bacino.

Se $b=0$ significa che niente dell'acqua(o, meglio, del tracciante iniettato) che esce dal bacino rientra nella fase successiva, mentre se $b=1$ è l'esatto opposto, ovvero rientra tutto il tracciante precedentemente uscito.

Se supponiamo di chiamare T_r il tempo di residenza per $b=0$, abbiamo che:

$$T_r = \frac{VT}{P}$$

che unita all'equazione 2.4 diventa:

$$T_f = \frac{VT}{(1-b)P} = \frac{T_r}{1-b} \quad (2.5)$$

quindi

$$b = \frac{T_f - T_r}{T_f}$$

Si vede che è così possibile determinare il fattore di ritorno una volta noti i soli T_f e T_r ; questa formulazione non dipende nè dal prisma di marea P nè dal periodo della marea T o dal volume del bacino V .

Conclude tuttavia lo studio affermando che nel caso non ci sia modo di stimare il fattore di ritorno tenendo conto di tutte queste caratteristiche, è possibile assumerlo pari a 0.5 .

2.3.2 Modello modificato

Si consideri un bacino d'acqua soggetto a un ciclo di marea e comunicante con il mare attraverso una sezione definita. Si definisce $c(t)$ la concentrazione media di un tracciante posto in tale bacino all'inizio della fase di riflusso:

$$c(t) = \frac{M(t)}{V_0 + P/2} \quad (2.6)$$

dove $M(t)$ è la massa totale del tracciante presente nel bacino, V_0 è il volume d'acqua nel bacino e P è il prisma di marea, cioè il volume d'acqua entrante o uscente dal bacino durante un ciclo di marea.

Considerato che il ciclo di flusso e riflusso si completi in un tempo T , la massa ΔM_e uscente dal bacino durante la fase di riflusso si può scrivere come:

$$\Delta M_e = \int_0^{T/2} c_e(\tau) Q_e(\tau) d\tau = \int_0^{T/2} \xi(\tau) c(\tau) Q_e(\tau) d\tau \quad (2.7)$$

dove $Q_e(t)$ è la portata uscente dal bacino, $c_e(t)$ è la concentrazione uscente, cioè la concentrazione nel bacino vicina alla sezione di confine tra il bacino e il mare, che è generalmente più piccola della concentrazione media $c(t)$ e la variabile $\xi(t) = c_e(t)/c(t)$ può essere considerata un coefficiente di mescolamento. Si può quindi approssimare la 2.7 come:

$$\Delta M_e \approx \xi c(t) P \quad (2.8)$$

La concentrazione media alla fine della fase di riflusso, $c(t + T/2)$ è data da:

$$c(t + T/2) = \frac{M(t) - \Delta M_e}{V_0 - P/2}$$

da cui, sostituendo la 2.6 e la 2.7, si ottiene:

$$c(t + T/2) = \frac{c(t)(V_0 + P/2) - \xi c(t) P}{V_0 - P/2} = c(t) \frac{V_0 + P/2 - \xi P}{V_0 - P/2} \quad (2.9)$$

La massa M_f entrante nel bacino durante la fase di flusso può essere scritta come:

$$\Delta M_f = \int_{T/2}^T c_r(\tau) Q_f(\tau) d\tau \quad (2.10)$$

dove $Q_f(t)$ è la portata entrante nel bacino e $c_r(t)$ è la concentrazione del flusso entrante, cioè la concentrazione residua presente in mare vicino alla sezione di confine tra mare e bacino. Si può quindi approssimare la 2.10 come:

$$\Delta M_f \approx c_r P$$

e c_r come una frazione della concentrazione uscente b , cioè:

$$c_r \cong b \frac{\Delta M_e}{P} = b\xi c(t) \quad (2.11)$$

quindi

$$\Delta M_f \cong b\xi c(t)P \quad (2.12)$$

La concentrazione media alla fine della fase di flusso, cioè alla fine di un intero ciclo di marea, $c(t+T)$ è data da:

$$c(t+T) = \frac{M(t) - \Delta M_e + \Delta M_f}{V_0 + P/2} \quad (2.13)$$

da cui sostituendo con la 2.6, la 2.7 e la 2.12 si ottiene:

$$c(t+T) = \frac{c(t)(V_0 + P/2) - \xi c(t)P + b\xi c(t)P}{V_0 + P/2} \quad (2.14)$$

e raccogliendo $c(t)$:

$$c(t+T) = c(t) \frac{V_0 + P/2 - \xi P + b\xi P}{V_0 + P/2}$$

Sottraendo a entrambi i membri $c(t)$ si ha:

$$c(t+T) - c(t) = c(t) \frac{V_0 + P/2 - \xi P + b\xi P - V_0 - P/2}{V_0 + P/2}$$

e dividendo per T si ottiene

$$\frac{c(t+T) - c(t)}{t} = c(t) \frac{-\xi P + b\xi P}{T(V_0 + P/2)}$$

A questo punto si può raccogliere P al numeratore del secondo membro, essendo P/T costante e applicare il limite per T tendente a zero:

$$\lim_{T \rightarrow 0} \frac{c(t+T) - c(t)}{t} = \frac{dc}{dt} = -c(t)\xi \frac{1-b}{V_0} \left(\frac{P}{T}\right)$$

cioè

$$\frac{dc(t)}{dt} = -c(t)\xi \frac{1-b}{V_0} \left(\frac{P}{T}\right)$$

e integrando l'equazione si ha:

$$\ln c(t) = -\xi \frac{1-b}{V_0} \left(\frac{P}{T}\right) t + cost$$

dove per $t = 0$ la concentrazione $c(t = 0) = c_0$ quindi la costante di integrazione vale:

$$\ln c_0 = cost$$

Passando agli esponenziali e sostituendo la costante si ricava l'equazione risolutiva del problema, che descrive l'andamento della concentrazione $c(t)$ come:

$$\frac{c(t)}{c_0} = \exp\left\{-\xi \frac{1-b}{V_0} \left(\frac{P}{T}\right)t\right\}$$

Quando il rapporto $c(t)/c_0$ è pari alla soglia $1/e$, il tempo t è pari al tempo caratteristico del fenomeno, chiamato qui tempo di ricambio. Esso vale:

$$T_e = \frac{V_0 T}{\xi(1-b)P} \quad (2.15)$$

Confrontando questa formulazione 2.15 con la 2.4 si vede subito che la differenza principale sta nel fatto di aver introdotto il coefficiente ξ che tiene conto della non uniformità spaziale della concentrazione (cioè del mescolamento) nel bacino preso in esame.

Verosimilmente risulta improbabile che un bacino, come può essere la laguna di Venezia, caratterizzato da zone aventi profondità molto diverse da loro, dalla presenza di canali artificiali e di barene, e da zone lontane dalle sezioni di porto in cui la circolazione risulta molto minore, possa avere un mescolamento perfetto come viene considerato nella formulazione classica del modello basato sul prisma di marea.

Se volessimo elaborare la formula 2.15 come fatto per ottenere la 2.5 vedremo che se $b = 0$ abbiamo che:

$$T_r = \frac{VT}{\xi_0 P}$$

che unita alle 2.15 diventa:

$$T_e = \frac{V_0 T}{\xi(1-b)P} = \frac{\xi_0}{\xi} \frac{RT}{1-b} \quad (2.16)$$

quindi

$$\frac{T_r}{T_e} = r = (1-b) \frac{\xi}{\xi_0}$$

da cui

$$r\xi_0 = (1-b)\xi \quad (2.17)$$

Capitolo 3

La laguna di Venezia: inquadramento morfologico e ambientale

3.1 Origine ed evoluzione di una laguna

Le lagune sono bacini di acqua prevalentemente marina, generalmente poco profondi, separati dal mare da strisce o cordoni litoranei di terra sabbiosa (solo nei mari tropicali è possibile trovare lagune racchiuse entro barriere coralline), interrotti da bocche che costituiscono comunicazione tra laguna e mare.

L'alveo lagunare è formato di materiale fino o molle, facilmente elaborabile dall'acqua in movimento. Il limo e l'argilla hanno (a differenza della sabbia) la particolarità di poter essere rimossi dall'acqua solo per sue velocità molto maggiori di quella che ne permise la sedimentazione; per questo motivo se nella laguna prevalgono acque torbide, facilmente si formano depositi irreversibili e la laguna tende ad interrarsi.

Le suddette strisce litoranee di terra e sabbia sono formate da materiale apportato dai fiumi e dal mare ed allineato con regolarità per azione di quest'ultimo. Esse in certe località tendono ad estendersi, ed alcune bocche lagunari sono ostruite. Altrove tali strisce litoranee, talora molto ristrette, sono minacciate dagli attacchi del mare, il quale distruggendone durante le burrasche i tratti più sottili invaderebbe la laguna. Perciò una laguna si presenta spesso come una formazione costiera transitoria.

Molteplici sono i fattori che influenzano il processo evolutivo fisico compresi quelli già accennati: il trasporto solido dei fiumi (oppure l'accumulo di sabbie provenienti dalla disgregazione di promontori costieri), le correnti marine litoranee, le maree, il moto ondoso e, talora, l'abbassamento del suolo e l'aumentare del livello del mare.

I fiumi provenienti da rilievi montuosi di più recente formazione, e quindi soggetti a forte erosione, trasportano molto materiale solido; le sabbie e i limi, che ne costituiscono la parte più fina riescono a giungere al mare, dando luogo a formazioni protese, i delta. Dalle foci dei fiumi le sabbie ancora in sospensione, o messe in sospensione dal moto ondoso, vengono trasportate dalle correnti costiere, laddove esistono, depositandosi poi, per affetto della gravità, in formazioni allungate dette barre o cordoni litoranei. Un tratto di costa compreso tra formazioni deltizie tende così a trasformarsi in un bacino parzialmente isolato dal mare tramite le barre costiere, cioè in una laguna o, al limite, in un bacino totalmente chiuso da un'unica barra, cioè in uno stagno costiero.

I varchi tra le barre costiere generalmente corrispondono a foci di fiumi rimasti inclusi all'interno del bacino lagunare; le formazioni deltizie di questi fiumi contribuiscono a costituire quell'alternarsi di terreni emersi, canali e specchi acquei tipico dei bacini lagunari. Le barre costiere, su cui il moto ondoso del mare antistante continua a depositare sabbie in forma di dune, si trasformano poi in lidi veri e propri; i varchi tra i lidi sono detti bocche di porto o più brevemente porti. Le correnti di flusso e riflusso, che si producono tra mare e laguna quando il mare antistante è soggetto a oscillazioni di marea sufficientemente elevate, mantengono efficienti le bocche di porto, trasportando in mare anche parte dei sedimenti provenienti dai fiumi interni, in certo modo ripulendo la laguna.

L'attenuazione dei valori estremi del livello di marea nelle zone più interne della laguna è, di solito, una condizione necessaria (ma non sufficiente) anch'essa si conservi; nel caso opposto il mare prevale, erodendo, con correnti di marea troppo veloci, tutte le formazioni emerse, compresi i lidi stessi. Tra le altre cause che determinano la fine di una laguna possono esservi fattori eccezionali e di breve durata, come ad esempio mareggiate molto forti che, accumulando sabbie alle bocche portuali, possono rendere le correnti di marea troppo deboli per ripristinare i preesistenti varchi, innescando un processo di ulteriore accumulo di sabbie all'occlusione delle bocche.

Anche il trasporto delle sabbie costiere dalle foci dei fiumi adiacenti, prevalendo

sulle correnti attraverso le bocche, può portare all'ostruzione di quest'ultime. E così pure il trasporto solido dei fiumi all'interno di una laguna può lentamente provocarne l'interrimento.

Al contrario, un lento sprofondamento del sottosuolo lagunare può compensare l'apporto solido dei fiumi interni ed essere quindi il fattore determinante per la conservazione di una laguna. Infine, anche l'aumento del livello del mare può favorire la formazione di bacini lagunari, secondo un meccanismo che produce dapprima l'innalzamento del letto del tratto terminale dei fiumi poi, per la minore pendenza degli alvei, esondazioni e formazioni di paludi costiere: l'invasione marina trasforma infine le paludi in lagune.

Si può riassumere l'evoluzione di una laguna nei tre seguenti scenari:

- se prevalgono i materiali solidi introdotti dai fiumi e dal mare, una laguna tende a interrarsi e a trasformarsi in terra emersa, con la scomparsa del bacino stesso, così come oggi avviene sul delta del Po;
- se prevalgono invece le forze erosive delle onde e delle maree, cioè il bilancio complessivo dei sedimenti è negativo, una laguna si trasforma in un braccio di mare, attuale tendenza della laguna di Venezia;
- se erosione e sedimentazione si compensano, cioè esiste un corretto bilancio ripascimento-erosione (non locale ma per l'intero bacino lagunare), l'ambiente lagunare sopravvive, seppur in equilibrio precario e instabile.

E' possibile concludere dicendo che i fattori che concorrono alla formazione di una laguna sono gli stessi che ne provocano la scomparsa.

3.2 La laguna di Venezia

Esaminando un atlante geografico per osservare in quali parti del mondo esistano lagune, si riconosce che esse sono molto comuni lungo le coste con acque poco profonde di mari ed oceani di formazione geografica recente, e soggette all'apporto di materiali alluvionali da vicini fiumi. Talora esistono lagune anche in località dove le maree hanno ampiezza notevole.

In Italia abbiamo esempi di lagune quali: Grado e Marano, Venezia, Comacchio, Lesina e Varano, Taranto, Patria, Fondi, Sabaudia, Caprolace, Orbetello, Cagliari. Tra queste la laguna di Venezia è la più grande, avendo una lunghezza di circa 48Km ed una larghezza da 8 km a 14 km. E' anche la più importante, perchè in essa si trova la città di Venezia.



Figura 3.1: Immagine dall'alto della laguna di Venezia. Si possono notare le tre bocche di Chioggia, Malamocco e Lido (da sud a nord, rispettivamente) e la città di Venezia al centro della laguna.

3.2.1 Evoluzione storica della laguna di Venezia

La laguna di Venezia è nata circa 6-7000 anni fa, in seguito all'ultima glaciazione. Gli apparati deltizi dei fiumi padani si protrassero verso il mare in funzione del loro trasporto solido, delle correnti costiere e del moto ondoso e l'azione combinata di tali fattori portò alla formazione dei lidi, i quali delimitarono specchi d'acqua che assunsero le caratteristiche di ecosistema salmastro. Verso l'anno 1000 d.C. l'area caratterizzata dalla laguna veneta era compresa tra l'Adige a sud e il Piave a nord e al suo interno si immettevano i fiumi Bacchiglione, Brenta e altri corsi di risorgiva minori, tra i quali il Dese e il Sile. In questa epoca la laguna presentava otto bocche di porto e, valutando l'apporto solido fluviale da un lato, l'azione erosiva della marea e del moto ondoso dall'altro, era prevalente l'azione di apporto di

materiali in sospensione da parte dei fiumi, cosa che provocava impaludimenti e rendeva l'ambiente invivibile.

Allo scopo di contenere le piene dei corsi d'acqua, dal 1300a.C. la Repubblica di Venezia intraprese una serie di opere di diversione dei fiumi dalla laguna, che continuarono sotto i diversi domini politici dell'area fino ad epoca moderna. L'opera della Serenissima tuttavia, risolto il problema dell'interrimento da un lato, lasciava poco contrastata l'erosione marina dall'altro. Solo nel 1700a.C. venne messo a punto dallo Zandrini un intervento innovativo e risolutore: la costruzione dei *murazzi*, lungo il versante a mare dei litorali.

Gli interventi che più caratterizzarono il periodo tra il XIX e il XX furono quelli volti alla riduzione dell'insabbiamento delle bocche portuali per opera delle correnti litoranee: il progresso economico che portò all'instaurarsi di produzioni industriali nella zona, determinò la necessità di assicurare un passaggio sicuro alle tre imboccature portuali rimaste, senza dimenticare di assicurare un anche il ricambio delle acque lagunari. Per questa ragione verranno realizzate imboccature portuali di sezione adeguata, protette da moli foranei protesi in mare fino a raggiungere fondali di una certa profondità, nonché dragaggi per realizzare dei canali artificiali necessari alla navigazione.

Sostanzialmente gli interventi operati tra la metà dell'Ottocento e gli anni Sessanta hanno influito sul regime idrodinamico in due modi: la ristrutturazione delle bocche di porto, lo scavo di nuovi e profondi canali portuali e la sottrazione di aree all'espansione della marea hanno reso più celere l'ingresso delle acque marine; l'intensivo sfruttamento delle acque artesiane, favorendo l'approfondimento del bacino lagunare, ha reso percorribili dai flussi di marea ampie zone alternative ai canali.

3.2.2 Morfologia

La laguna di Venezia è la più vasta d'Italia e copre una superficie di circa 550 km², che si divide in parti emerse e parti d'acqua: le prime comprendono la terraferma, che rappresenta l'8% dell'intera superficie, le seconde sono costituite da canali per il 2%, da specchi d'acqua, bassifondi, *velme* e *barene* per l'80%.

La profondità dei fondali in laguna è molto variabile: arriva a 15-20 m nei canali, a 1-3 m negli specchi d'acqua e a pochi centimetri nei bassifondi. Le velme emergono solo in occasione delle basse maree, mentre le barene, ad eccezione di eventuali allagamenti, sono quasi sempre emerse. Le acque del mare penetrano in laguna

attraverso tre bocche di porto, denominate rispettivamente da quella più a nord a quella più a sud:

- porto di Lido,
- porto di Malamocco,
- porto di Chioggia.

L'acqua marina che entra da una bocca durante la fase di flusso esce dalla stessa bocca durante la fase di riflusso in quanto l'alta marea, come la bassa, si presenta quasi nello stesso momento all'ingresso delle tre bocche di porto. Queste, infatti, giacciono all'incirca su linee di ugual fase rispetto al moto oscillatorio della marea nell'Adriatico.

L'oscillazione di marea è determinata dalle azioni attrattive combinate della Luna e del Sole (marea astronomica) ed è influenzata dagli eventi meteorologici (marea meteorologica). Nel Mediterraneo, la marea dovuta alla rotazione terrestre ha una frequenza di dodici ore circa e, nel corso del mese, è influenzata in modo diverso a seconda delle fasi lunari.

L'ampiezza dell'oscillazione varia secondo un ciclo di quasi quindici giorni, da valori massimi in sizigia, quando il Sole e la Luna sono allineati con la Terra (fasi di luna nuova e di luna piena), a valori minimi in quadratura (fasi di primo e ultimo quarto), quando il Sole e la Luna sono perpendicolari rispetto alla Terra.

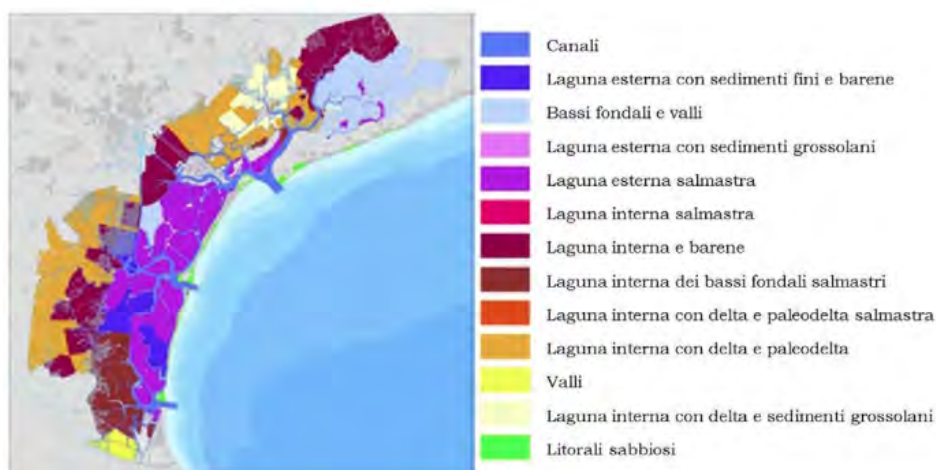


Figura 3.2: Componenti morfologiche della laguna di Venezia.

Con questa ciclicità, le correnti di marea di flusso e di riflusso entrano ed escono dalle bocche di porto, espandendosi gradualmente verso l'interno attraverso la rete di canali della laguna, favorendo così l'ossigenazione e il disinquinamento per diluizione. Questi canali, che in parte si sovrappongono agli alvei degli antichi fiumi, sono il risultato dell'opera di modellazione della marea che ne determina anche l'esistenza.

Gli ultimi e più sottili rami dei canali sono detti *ghebi*; attraverso di essi la marea raggiunge anche le zone più interne, che in passato erano dette "laguna morta" perchè, quando le bocche non erano sufficientemente ampie, non risentivano se non in modo estremamente limitato dell'azione vivificante della marea.

La propagazione della marea all'interno della laguna è infatti condizionata dalla



Figura 3.3: Barena attraversata da *ghebi*.

lunghezza e dalla profondità dei canali adduttori e dall'estensione e profondità delle zone interne a basso fondale che i canali alimentano.

Nelle zone interne più distanti dal mare, come quelle ai margini del bacino nord di Lido e del bacino di Chioggia, l'oscillazione di marea arriva, notevolmente attenuata, con un ritardo che va dalle due alle tre ore. Tipiche forme di queste zone interne sono le paludi e le velme.

Le paludi, il cui nome rimanda a quelle più antiche di origine fluviale, sono bacini minori, a forma di catino, alimentati dai ghebi e caratterizzati da una profondità

sufficiente a lasciarli costantemente sommersi; le velme invece possiedono fondali meno profondi.

Queste ultime, durante le basse maree, emergono mettendo in evidenza il colore grigio dei fondali particolarmente melmosi; quando vi è un forte accumulo di alghe verdi, assumono invece una colorazione intensa e brillante, che da lontano sembra una rigogliosa prateria.

La distinzione tra zone sommerse e zone emerse in laguna non è affatto netta; le cosiddette zone emerse, come le isole e Venezia stessa, dove sorgono i maggiori insediamenti urbani, sono oggi a loro volta soggette a saltuaria sommersione a causa dell'abbassamento del suolo e dell'eustatismo.¹

Tra le zone emerse si includono generalmente le barene, forme che più di altre caratterizzano il tessuto lagunare. Esse vengono solo periodicamente sommerse e per questo motivo sono ricoperte di vegetazione alofila; per definizione dovrebbero avere una quota (sul livello del mare) tale da essere sommerse soltanto dalle alte maree di sizigia ma oggi, nelle zone più soggette a subsidenza, la loro quota si è notevolmente abbassata.²

Altro elemento caratteristico della morfologia lagunare sono le valli da pesca.

¹L'eustatismo, fenomeno di variazione del livello del mare, è indotto da cambiamenti climatici che influenzano la massa e il volume degli oceani. Infatti durante i periodi freddi le precipitazioni vengono trattenute sotto forma di ghiacci e di conseguenza il livello del mare si abbassa; il contrario avviene nei periodi caldi. L'innalzamento eustatico del livello del mare, fenomeno indipendente dalla subsidenza, concorre a ridurre l'altimetria del suolo che, va riferita al livello marino.

²Tutta la pianura padano-veneta risulta soggetta a una subsidenza naturale, cioè ad un lento abbassamento del suolo (risultato in superficie di una serie di processi che si esplicano nel sottosuolo) dovuto sia a una deformazione tettonica profonda, sia, soprattutto, al compattamento dei depositi fini (silt e argille) recenti. Tale consolidamento si è rivelato più accentuato laddove le acque saline si sono sostituite a quelle palustri determinando fenomeni chimico-fisici che hanno favorito il consolidamento dei depositi di argille e limi. Il processo è avvenuto perciò in modo arealmente differenziato in relazione alla locale composizione dei sedimenti. Al fenomeno della subsidenza naturale si è aggiunto poi, nel XX secolo e soprattutto a partire dagli anni Trenta con l'insediamento del polo industriale a Marghera, un processo di sprofondamento indotto dall'estrazione intensiva di acqua dalle falde artesiane del sottosuolo per l'approvvigionamento idrico degli stabilimenti. Il prelievo di ingenti quantità d'acqua ha provocato infatti una diminuzione della pressione idrostatica delle falde acquifere. Il fenomeno si è arrestato negli anni Settanta però è stato, anche se per breve tempo, estremamente più intenso della subsidenza naturale. È bene ricordare che la subsidenza naturale ha un'evoluzione temporale lenta, avvertibile solo in tempi da storici a geologici, mentre con la subsidenza indotta dalle attività antropiche si hanno effetti avvertibili in tempi brevi.

Costituite da specchi acquei poco profondi detti laghi e da addensamenti di barene, erano anticamente alimentate da canali secondari e dai relativi ghebi che facevano parte integrante del tessuto morfologico stesso delle valli.

Benchè la loro delimitazione fosse in parte realizzata con argini di fango, la separazione tra la parte interna ed esterna dei canali alimentatori era costituita da arelle, strutture a graticcio di canne palustri, che allo stesso tempo trattenevano il pesce all'interno e consentivano il passaggio, sia pure attenuato, delle correnti di marea.

Fino al XVII secolo esse occupavano non solo spazi tra i canaletti della laguna morta, dove le deboli correnti di marea di allora non era quasi possibile arrivare, ma si estendevano o tendevano ad estendersi anche nelle acque più ossigenate delle aree più prossime alle bocche di porto.

Oltre agli apparati morfologici interni, importanti elementi dell'organismo lagunare sono i cordoni litoranei o lidi.

Questi si estendono per una cinquantina di chilometri tra la foce dei fiumi Brenta a sud-ovest e Sile a nord-est, divisi dalle tre bocche di porto nei quattro segmenti di Sottomarina, Pellestrina, Lido e Cavallino.

La larghezza dei due tratti insulari va da poche decine di metri a Pellestrina a circa mezzo chilometro al Lido.

Come già detto in precedenza, i cordoni litoranei sono elementi sempre instabili e per questa in origine, il litorale aveva un aspetto molto diverso da quello attuale, era infatti costituito da una zona di spiaggia più o meno estesa, da un sistema di dune con una ricca vegetazione costiera e più internamente da una zona di boscaglia.

In tempi recenti la fascia a spiaggia, sottoposta a forti fenomeni erosivi, ha subito notevoli riduzioni mentre la zona delle dune è per la maggior parte scomparsa anche a causa della forte antropizzazione del territorio.

3.2.3 Flora e fauna

I biotipi lagunari, ossia i luoghi dove si sviluppano particolari comunità vegetali o animali, sono tutti ambienti pianeggianti costituiti da terreni alluvionali, a granulometria piuttosto sottile (sabbie e argille) e caratterizzati dall'acqua circolante che può essere salata o dolce.

La salinità dell'acqua costituisce un importante fattore di selezione per gli organismi viventi: nella fascia di gronda, ovvero la zona interessata da immissari

fluviali e di valli dolci, prevale una vegetazione tipicamente palustre; barene e dune del litorale sono caratterizzate rispettivamente da vegetazione *alofila* (dei suoli salmastri) e *psammofila* (dei suoli sabbiosi).

Percorrendo un'ideale itinerario normale alla linea di costa e diretto verso l'entroterra, si osserva prima di tutto la presenza del litorale sabbioso.

Queste zone litoranee presentano diversi livelli di colonizzazione vegetale, che corrispondono a diverse fasce dell'ecosistema: dalla vegetazione pioniera delle sabbie, a quella propria dei cordoni dunosi, fino al consolidamento delle dune più arretrate.

Alle spalle del litorale si entra nell'ambiente propriamente lagunare, con le profonde foci marine delle bocche di porto e i grandi alvei collettori ai quali si affiancano gli estesi specchi d'acqua della laguna viva, quindi i bassifondali, le velme e infine gli apparati di barena.

Le barene sono colonizzate da vegetazione alofila, costituita cioè da specie particolarmente adattate a vivere su suoli salati, fisiologicamente aridi e pertanto inospitali per la stragrande maggioranza delle piante.

Le maree, oltre ad influenzare il ricambio idrico della laguna, creano sulle barene e ai margini delle isole numerosi microambienti, caratterizzati da suoli con differente tasso di salinità su cui si sviluppano vegetazioni alofile differenti. Alcune di queste, per le condizioni ambientali assai limitate, sono formate da poche specie assai specializzate; altre invece ne comprendono un numero più elevato, ma a valenza ecologica più ampia.

Sopra la barena, che costituisce senza dubbio l'aspetto più appariscente del paesaggio lagunare, il fitto manto vegetale sembra formare una copertura piuttosto uniforme. In realtà differenti gradi di salinità portano allo sviluppo di un mosaico di popolamenti vegetali assai affini tra loro.

Le barene sono anche molto importanti in quanto svolgono alcune funzioni fondamentali per l'equilibrio ambientale della laguna: frenano il moto ondoso e inducono notevoli benefici sull'idrodinamica. Creano infatti percorsi obbligati alle correnti d'acqua guidando la propagazione della marea in laguna e amplificando l'azione dei canali. Infine hanno un effetto depurante sull'acqua grazie alla vegetazione alofila, cui offrono l'habitat ideale.

Dove la salinità diminuisce ed i suoli risentono della presenza di falde d'acqua dolce, in particolare nelle barene in prossimità della zona di gronda, compaiono praterie caratterizzate dalla densa aggregazione di giunchi.

Mentre i siti di gronda in prossimità delle foci dei corsi d'acqua che ancora sfociano

in laguna (soprattutto Dese e Silone) sono le aree di massima espressione dei canneti.

Per quanto riguarda i fondali lagunari, la vegetazione che li ricopriva fino a poco tempo fa era costituita dalle vaste praterie di *fanerogame*³ che con il loro complesso apparato radicale contribuivano a consolidare i fondali (vedi figura 3.5). Oggi queste piante sono molto meno diffuse, mentre molto ricca è la presenza di specie di alghe, anche rare.

Centinaia di specie animali, con riferimento ai soli vertebrati, popolano il variegato ambiente lagunare, monotono su vaste superfici centrali ma ricco di situazioni

³Le fanerogame sono piante che si riproducono a mezzo di semi ed hanno foglie, fusto e fiori. Esistono anche fanerogame adattate alla vita in ambienti marini e di transizione e per questo sono dette fanerogame marine le specie presenti nella Laguna di Venezia. Esse sono piante superiori che, grazie allo sviluppo dell'apparato radicale, sono in grado di stabilizzare il sedimento e di attenuare il moto ondoso attraverso una maggiore resistenza data dall'insieme dei ciuffi fogliari.



Figura 3.4: Barene.



Figura 3.5: Esempio di specie di fanerogame.

diversificate nelle fasce geografiche periferiche, in cui la stessa laguna è interessata alle dinamiche di interscambio idraulico ed energetico con i collegati ecosistemi fluviale e marino.

Le componenti sistematiche delle molteplici comunità faunistiche lagunari sono caratterizzate dalla presenza decisiva delle due classi dei pesci e degli uccelli.

Le altre classi della fauna superiore vivente in laguna, anfibi, rettili e mammiferi, risultano essere presenti nel mosaico di biotopi descritto con poche decine di specie, il cui ruolo ecologico appare sostanzialmente marginale, anche se complementare a quello dei pesci e degli uccelli.

Per quanto riguarda la fauna di invertebrati che popola i fondali della laguna, essa risulta essere molto speso ricca e abbondante, anche se molto influenzata da fattori variabili come la composizione fisico-chimica dei fondali, la salinità, la temperatura e l'ossigeno disciolto.

3.3 Evoluzione morfologica

I principali fattori che condizionano i fenomeni morfologici in laguna sono di origine naturale e legati all'azione dell'uomo. Il peso relativo di questi fattori determina l'entità dei fenomeni in modo differente a seconda dei luoghi, delle forme e dei processi presenti nelle diverse aree della laguna.

Fino al momento in cui i fiumi, in modo particolare il Brenta, sfociavano in laguna, i processi di sedimentazione dominavano la sua evoluzione morfologica.

I conseguenti interrimenti riducevano i fondali degli specchi d'acqua, favorendo il loro progressivo innalzamento fino a farli emergere e a trasformarli in barene, le quali andavano via via occupando superfici sempre più estese all'interno della laguna.

Allontanati i fiumi e venuto meno il cospicuo apporto di sedimenti dall'esterno, i processi erosivi hanno incominciato a prevalere sui fenomeni di deposito e la tendenza evolutiva dell'intero sistema lagunare si è invertita.

La laguna, a causa dell'azione congiunta dell'innalzamento del livello medio del mare e della subsidenza del suolo, ma non solo, ha visto drasticamente ridursi, soprattutto durante l'ultimo secolo, le superfici occupate dalle barene. Parallelamente si sono incrementate le profondità delle velme e delle zone d'acqua che si affiancano ai canali.

Oggi i bassifondi della laguna viva non si scoprono più nemmeno durante gli stati

di bassa marea eccezionale.

La tendenza all'approfondimento generalizzato dei fondali delle zone d'acqua ha di fatto annullato l'antico ruolo idrodinamico dei canali lagunari nel controllo della propagazione della marea, modificando radicalmente il regime delle correnti in quasi tutta la laguna. Il destino della laguna di Venezia sembra dunque quello di diventare un braccio di mare.

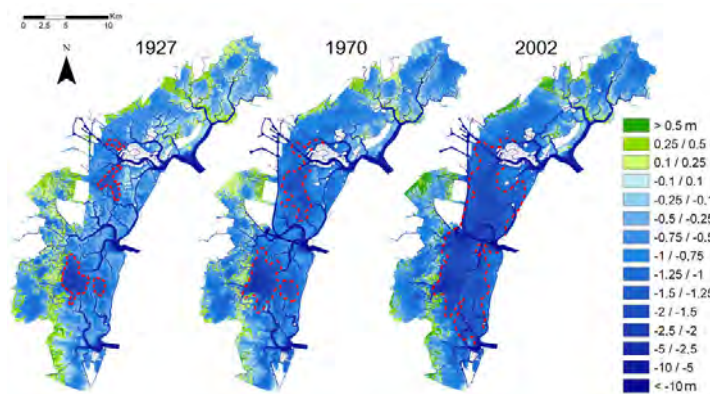


Figura 3.6: Confronto tra batimetrie della laguna nell'ultimo secolo.

Tra le cause naturali che si evidenziano in laguna e che contribuiscono alla sua trasformazione in un ambiente marino ci sono:

- il moto ondoso indotto dai natanti, dalle correnti e al vento
- scomparsa delle fanerogame, una pianta acquatica
- i fenomeni di subsidenza ed eustatismo del suolo

Il moto ondoso, causato dalle correnti, dal vento e dalle imbarcazioni a motore, non solo aggrava il processo di erosione delle strutture morfologiche, ma è accentuato dall'approfondimento dei fondali e dalla scomparsa delle barene, che amplificano la violenza delle onde. Infatti una volta innescato il processo erosivo, questo tende ad autoalimentarsi, perchè l'approfondimento generale dei bassifondi causa un aumento rilevante del moto ondoso, che a sua volta determina un'erosione sempre più forte.

Anche la scomparsa delle fanerogame, principalmente dovuta all'inquinamento, ha privato la laguna di un'importante pianta acquatica che, con le sue radici, consolida i fondali, contrastando l'erosione.

Il delicato equilibrio dell'ecosistema lagunare e dei suoi centri abitati è influenzato inoltre da fattori antropici, quali:

- la diversione dei fiumi
- realizzazione di tre moli foranei che delimitano i canali di porto
- l'adeguamento delle vie di comunicazione e il drenaggio dei canali
- la costruzione di un polo industrial
- bonifiche e valli da pesca
- il MoSE - Modulo Sperimentale Elettromeccanico

La perdita di apporto sedimentario può essere attribuita alla diversione dei fiumi (Brenta, Bacchiglione, Piave, Sile) all'esterno della laguna, operata dalla Serenissima al fine di scongiurare il rischio di interrimento della laguna o delle bocche di porto, ma che nel tempo ha provocato la tendenza opposta: da un eccessivo interrimento si è passati ad una forte erosione.

Nel corso dell'800 sono stati effettuati altri importanti interventi, come la costruzione delle dighe armate alle tre bocche di porto (Lido, Malamocco e Chioggia), con l'intento di incanalare la marea e approfondire il canale d'accesso, la costruzione dei canali commerciali (Vittorio Emanuele e Canale dei Petroli), a favore della funzione portuale e commerciale di Venezia.

Questi interventi hanno tuttavia modificato l'idrodinamica interna, tanto che i canali portuali raggiunsero spontaneamente la profondità di 9-10 m (Malamocco) e di 7-8 m (Lido).

Al fine di collegare Venezia alla terraferma, nel corso dell'800 e del '900, sono stati costruiti il Ponte Ferroviario Translagunare, il Ponte Automobilistico, il terminale di Piazzale Roma, l'aeroporto "Marco Polo", interventi che hanno comportato l'interrimento di canali naturali, trasformati in strade. I due ponti, ferroviario e stradale, hanno rilevanza trasportistica ma producono anche interferenze idrauliche, non tanto sul regime di marea, ma piuttosto sulla loro capacità di schermare la laguna centrale, smorzando in direzione Sud-Ovest il moto ondoso generato dal vento di Bora.

Accanto all'adeguamento via terra, si è intervenuto anche via mare con l'approfondimento artificiale del canale di Lido, consentendo l'accesso di navi di stazza sempre maggiore al porto.

Negli anni '20 sono iniziati i lavori per la creazione del Porto Industriale di Marghera e, per raggiungerlo, sono stati creati nuovi canali. Negli anni '50 è stata ampliata la zona industriale e sono state costruite artificialmente le casse di colmata, in vista di un'ulteriore ampliamento. Tutti questi interventi hanno sottratto notevoli superfici di laguna, riempite con fango proveniente dallo scavo del Canale

dei Petroli.

La riduzione della superficie lagunare è anche il risultato degli interramenti effettuati a scopo di bonifica agraria (zona della Bonifica Delta Brenta) che hanno sottratto la zona all'espansione delle maree. A questi interventi si devono aggiungere le aree occupate dalle valli da pesca, tutte arginate, e le aree interrate per le espansioni urbane e per le sacche di discarica.

Infine, in ordine di tempo, ma non di importanza, sono iniziati nel 2003 i lavori per la costruzione delle paratoie mobili alle bocche di porto, a protezione della laguna dagli eventi di alta marea superiori a 110 cm sul livello del medio mare e fino ad un massimo di 3 m (MoSE).

Questi lavori, insieme ad altre opere come il rafforzamento dei litorali, il rialzo di rive e pavimentazioni, dovrebbero provvedere alla difesa della città di Venezia da eventi estremi e dal degrado morfologico, per il quale la laguna sta progressivamente cedendo al mare ed il livello del suolo si sta abbassando.

Sono da ricordare, inoltre, la contemporanea costruzione di opere compensative, ad esempio la costruzione di barene artificiali e il rinforzo di quelle esistenti, e di operazioni di dragaggio dei canali commerciali per il potenziamento della portualità di navi cargo.

Nell'arco di appena un secolo si riscontrano nella laguna centrale incrementi di profondità media di quasi 1 m, ben superiori agli effetti congiunti della subsidenza e dell'eustatismo, che non possono pertanto essere imputati come unica causa del fenomeno.

Il processo erosivo osservato a danno della laguna si è intensificato per opera dell'uomo attraverso i suoi numerosi e importanti interventi. Ne deriva una tendenza all'appiattimento dei fondali in tutta la laguna centrale, si osserva in particolare l'interrimento dei canali e l'abbassamento di quota dei bassifondi, fenomeni che si sovrappongono al generale approfondimento.

Le conseguenze idrodinamiche del fenomeno sono rilevanti. Infatti, la propagazione della marea all'interno della laguna non è più controllata dalle forze dissipative, che ne attenuano progressivamente i colmi e i cavi a misura che ci si allontana dalle bocche. La propagazione della marea risulta ora dominata dalle forze inerziali. Su quasi tutta la laguna, procedendo verso i limiti del perimetro delle valli da pesca, i colmi di marea tendono generalmente ad amplificarsi rispetto al mare.

La gestione degli ecosistemi costieri, come la laguna di Venezia, richiede pertanto una conoscenza dettagliata e aggiornata delle attuali condizioni idrodinamiche e

geomorfologiche, dei processi evolutivi in atto, naturali e/o indotti dalle attività antropiche, e una valutazione del bilancio dei materiali organici ed inorganici in sospensione nell'interscambio laguna-mare.

In letteratura si è spesso discusso sull'evoluzione morfologica della Laguna di Venezia: erosione e sedimentazione sono due fenomeni ben documentati in vari settori lagunari.

Sono pertanto da tenere sotto controllo la redistribuzione in laguna o in mare aperto dei sedimenti erosi, nonché il bilancio di entrata ed uscita dei sedimenti alle bocche di porto. Ne consegue che un'efficace e corretta gestione del bacino lagunare veneziano, data la sua complessità, richiede un'approfondita conoscenza dei processi fisici e geomorfologici, passati e in atto, e dell'idrodinamica che regola la loro intensità ed estensione.

Il delicato equilibrio tra processi erosivi e di deposito nel settore lagunare riveste quindi un ruolo di notevole importanza per la sopravvivenza della laguna stessa.

3.4 Inquinamento

Non fare almeno una breve considerazione sul tema dell'inquinamento ambientale a livello costiero sarebbe una grave mancanza vista l'importanza di queste aree: le zone costiere, infatti, sono fondamentali per l'equilibrio della vita nell'intero pianeta, poichè in esse si generano i grandi quantitativi di materia organica che sostengono il corretto assetto della catena alimentare marina. Nonostante queste acque rappresentino meno del 15% della superficie e circa lo 0,5% del volume degli oceani, da esse deriva il 90% delle nostre risorse ittiche.

La laguna di Venezia non è esente da queste problematiche.

In essa il problema dell'inquinamento delle acque è un fenomeno molto complesso dovuto alla molteplicità delle fonti inquinanti e alla peculiarità dell'ambiente.

La laguna viene infatti usata come corpo ricevente delle acque di scarico di tutta una serie di attività produttive e insediamenti urbani quali: la città di Chioggia, i litorali, le isole lagunari in gran parte prive di rete fognaria e di impianti di depurazione; la città di Venezia con una rete fognaria incompleta e solo alcuni impianti di depurazione in funzione.

Dal momento che Venezia non è mai stata dotata di un sistema fognario, un numero elevato di scarichi travasa nei canali le acque reflue di abitazioni, alberghi e attività artigianali, immettendo nel sistema carichi di sostanze nutrienti e inquinanti che

sono variabili nel tempo e difficili da stimare.

Un altro contributo di inquinanti deriva dal dilavamento delle superfici pavimentate e dai tetti, che si verifica con le precipitazioni.

La rete di canali raccoglie gli inquinanti che provengono dalla deposizione atmosferica, dallo sgretolamento degli edifici e dalla corrosione delle strutture metalliche dell'intera laguna.

Oltre a questi, è da considerare anche il traffico di natanti e di navi che rilasciano in laguna i prodotti di scarico.

C'è poi tutta la zona industriale che, senza controlli legislativi precisi e con uno sviluppo industriale accelerato, tra il 1950 e il 1970 gli impianti di Porto Marghera (stabilimenti siderurgici, chimici, e raffinerie petrolifere) smaltivano parte dei residui delle lavorazioni direttamente in laguna, solo parte in discariche, dove a volte venivano stoccati i residui solidi urbani.

La situazione è migliorata verso gli anni '80, con la costruzione di impianti di depurazione dove viene ormai convogliato l'80% degli scarichi industriali di Marghera e Mestre. Permane, però, forte l'effetto di rilasci d'inquinanti di origine industriale, conseguenti all'erosione e alle correnti.

I comuni dell'entroterra Veneto che scaricano le loro acque nei corsi d'acqua scolanti in laguna sono un altro fattore da non dimenticare: ogni secondo, infatti, 35 metri cubi di acqua dolce vengono mediamente immessi in laguna dai corsi d'acqua del bacino scolante.

Quest'acqua contiene differenti inquinanti, in differente concentrazione, con differente pericolosità ambientale, trasportati sia nella forma disciolta sia in associazione alle particelle inorganiche ed organiche in sospensione.

I valori del carico annuo stimati mostrano che il bacino scolante costituisce la principale sorgente di inquinanti per la laguna di Venezia. Ecco perchè la valutazione di questo contributo, sia spaziale che temporale, è essenziale per la protezione dell'ecosistema, la pianificazione di attività di ripristino ambientale e il controllo della qualità delle acque.

Infine, sono da prendere in considerazione le attività agricole dei territori circostanti la laguna, che utilizzano fertilizzanti, pesticidi, diserbanti, sostanze inquinanti che confluiscono in laguna attraverso i corsi d'acqua naturali o i collettori artificiali.

L'inquinamento delle acque è fondamentale per capire anche il fenomeno di *eutro-*

*fizzazione*⁴ che si sta sviluppando nella laguna di Venezia.

Le alghe e le piante acquatiche hanno bisogno, per compiere il proprio ciclo biologico, di luce, acqua e anidride carbonica, ma anche di nutrienti tra cui l'azoto e il fosforo.

L'apporto di nutrienti nei corsi d'acqua e nel mare può venire fortemente accelerato dalle attività umane che esercitano un'azione involontaria di fertilizzazione, determinata da fattori quasi sempre connessi tra loro e direttamente legati all'evoluzione demografica e al conseguente inquinamento dell'acqua.

Il fenomeno comporta una crescita eccessiva di alghe, piante acquatiche e fitoplancton, il cui sviluppo incontrollato rende difficile alla luce solare di penetrare nelle acque più profonde, inibendo il processo della fotosintesi delle alghe e delle piante acquatiche poste in profondità.

Quando poi la biomassa algale muore vi è un ulteriore conseguente diminuzione di ossigeno, causata dalla sua decomposizione da parte di microrganismi. Si parla di *ipossia* quando si verifica una significativa diminuzione dell'ossigeno disciolto nelle acque e i valori che indicano tale condizione sono compresi tra 3,0 e 1,0 mg/l, mentre si verifica una condizione di *anossia* quando la carenza di ossigeno disciolto è tale da raggiungere valori compresi tra 0 e 1,0 mg/l.

Condizioni di anossia possono verificarsi di frequente nelle aree lagunari soggette a ridotto ricambio idrico, e ciò può portare alla morte della fauna ittica e, nei casi estremi, di tutte le forme viventi.

Per tutti questi motivi è di fondamentale importanza poter determinare e analizzare alcuni indicatori idrodinamici che riescano a determinare la capacità di un bacino di rinnovare le proprie acque.

L'impiego di questi indicatori, semplici da calcolare e in grado di fornire indicazioni significative sull'intensità dei processi di ricambio, è utile anche in fase di progettazione di interventi volti al miglioramento della qualità delle acque, in quanto consentono di verificare agevolmente l'efficacia degli interventi proposti.

⁴ dal greco eutrophòs = ben nutrito; è un processo per cui un ambiente acquatico modifica il suo equilibrio ecologico per arricchirsi delle sostanze nutritive, soprattutto fosforo e azoto, di cui scarseggia; il processo può essere determinato da mutazioni naturali dell'ambiente ma, più frequentemente, da inquinanti (detersivi, fertilizzanti, ecc.) che lo accelerano.

Capitolo 4

Il modello idrodinamico

4.1 Introduzione

Volendo studiare la capacità di ricambio idrico del bacino lagunare, è necessario conoscere le caratteristiche idrodinamiche, in modo preciso e puntuale, che si instaurano quando è soggetto all'azione periodica delle onde di marea.

Il modello bidimensionale agli elementi finiti (2DEF), che implementa la soluzione discreta del sistema di equazioni differenziali che governano il problema è stato sviluppato internamente al dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA) dell'Università di Padova. Esso si basa sulla risoluzione delle equazioni per le onde lunghe 4.1 in acque basse con una tecnica ad elementi finiti: il dominio considerato viene discretizzato in elementi trinagolari 2D affiancati a elementi lineari 1D. Le equazioni del moto nelle direzioni orizzontali x, y mediate sulla verticale e l'equazione di continuità sono le seguenti ([5] *D'Alpaos, Defina*; [7] *Defina*):

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{Y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{Y} \right) - \left(\frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{bx}}{\rho} - \frac{\tau_{wx}}{\rho} + gY \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (4.1a)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{Y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{Y} \right) - \left(\frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{by}}{\rho} - \frac{\tau_{wy}}{\rho} + gY \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (4.1b)$$

$$\eta \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (4.1c)$$

in cui h indica la quota idrometrica, x, y sono le ascisse spaziali orizzontali correnti, g è l'accelerazione di gravità, ρ la densità del fluido, t è il tempo, q è la velocità integrata sulla verticale con componenti q_x e q_y secondo le due direzioni orizzontali, R_{ij} sono gli sforzi turbolenti (o di Reynolds) nel piano orizzontale, in cui i, j

indicano le direzioni x o y e $\tau_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ è lo sforzo tangenziale al fondo espresso dalla seguente equazione:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = gY \left(\frac{|q|}{k_s^2 H^{10/3}} \right) q \quad (4.2)$$

in cui k_s è il coefficiente di scabrezza secondo Strickler.

Nelle equazioni 4.1 compaiono i termini η , Y e H , i quali nel tempo generico e per ciascun elemento indicano, rispettivamente, la frazione locale di dominio allagato, il volume d'acqua per unità di superficie e una profondità d'acqua equivalente, introdotta per descrivere l'effetto dei termini dissipativi quando il tirante si riduce e diventa confrontabile con le dimensioni delle irregolarità del terreno. Tali termini sono dati dalle seguenti espressioni ([7] *Defina*):

$$\eta(h) = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{2D}{a_r} \right) \right) \quad (4.3a)$$

$$Y = \int_{-\infty}^h \eta dx = a_r \left(\eta \frac{D}{a_r} + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} e^{-4\left(\frac{D}{a_r}\right)^2} \right) \quad (4.3b)$$

$$H \cong Y + 0,27\sqrt{Y}a_re^{-2\frac{Y}{a_r}} \quad (4.3c)$$

in cui erf è la funzione errore, è una profondità media data dalla differenza tra la quota della superficie libera e quella del fondo e a_r indica l'altezza massima delle irregolarità locali del terreno.

In questa analisi il modello idrodinamico simula anche il trasporto e la diffusione di una sostanza conservativa o caratterizzata da una cinetica del primo ordine. L'equazione mediata sulla verticale che governa il fenomeno è la seguente:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{q_x}{Y} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{q_y}{Y} \frac{\partial C}{\partial y} - D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) = f(C) \quad (4.4)$$

in cui C è la concentrazione media sulla verticale del materiale trasportato, D è il coefficiente di diffusione D che è assunto pari alla viscosità cinematica turbolenta, calcolata in ogni punto del dominio e in ogni istante dal modulo idrodinamico e $f(C)$ descrive la cinetica della sostanza. Nel caso di sostanza conservativa (ad esempio un tracciante) si ha $f(C) = 0$.

Il modello di calcolo richiede innanzitutto la definizione di un file `.geo`, contenente le caratteristiche del dominio fisico di calcolo, costituito da un reticolo di nodi e maglie che riproducono col necessario grado di precisione la geometria del sito oggetto di studio, tanto più fitto quanto più necessaria è la raffinatezza del calcolo. Oltre al dominio di calcolo, è richiesto anche un file `.sim` con indicazioni sulle condizioni al contorno che caratterizzano il problema che si intende studiare e altre

istruzioni sulle modalità di calcolo da adottare.

Si utilizza il programma *Incidenze*, il quale consente la visualizzazione e l'elaborazione dei dati per la predisposizione dei file di input (.geo e .sim) e dei risultati relativi alle simulazioni effettuate con il modello Idrodinamico. Questo programma è costruito in forma di software interattivo a finestre e fornisce gli strumenti per la generazione, la visualizzazione e la modifica del reticolo di calcolo. Esso consente inoltre di visualizzare il file delle condizioni al contorno delle simulazioni (.sim) e il risultato delle stesse (.out), rappresentando graficamente i parametri idrodinamici forniti dal modello, quali livelli, tiranti, portate, velocità, sforzi al fondo, ecc.

Le rappresentazioni grafiche possibili includono diagrammi con andamento temporale dei parametri, profili longitudinali, mappe a colori e sequenze animate.

Per l'analisi dei tempi-scala è importante valutare l'andamento nel tempo non tanto dei livelli, ma piuttosto delle concentrazioni, i cui valori, calcolati nelle simulazioni, si sono rielaborati mediante un programma specifico, in modo da poterli visualizzare in *Incidenze* al posto dei livelli.

Nei paragrafi seguenti si fornisce una descrizione più dettagliata riguardante le specifiche modalità di creazione/compilazione dei files e delle condizioni al contorno adottate per il calcolo delle concentrazioni puntuali e nel tempo nella laguna e dalle quali si parte per l'analisi del tempo di ricambio.

4.2 Dominio di calcolo: file.geo

Il file .geo, fornito dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova, contiene la definizione planimetrica e batimetrica della laguna di Venezia relativa all'anno 2003.

La costruzione del dominio prevede la riproduzione dei confini dell'area d'interesse, dei contorni dei bacini idrici e degli elementi più salienti del paesaggio, al fine di ottenere una rappresentazione quanto più possibile aderente alla realtà. In questa fase ci si affida al supporto di specifica cartografia in formato vettoriale elaborata da enti istituzionali (come per esempio le Carte Tecniche Regionali) o ai risultati di studi e rilievi condotti direttamente in sito.

Per ottenere la discretizzazione spaziale del dominio ci si affida al software *Incidenze*, il quale realizza una serie di elementi monodimensionali (nodi) e bidimensionali (maglie triangolari) che formano la cosiddetta *mesh*, su cui applicare le equazioni

che descrivono il problema idraulico. Dove si prevede la necessità di una maggiore accuratezza di calcolo si affina la mesh, in modo da ottimizzare il carico computazionale richiesto dal modello.

Il dominio di calcolo utilizzato, che include una buona porzione di tratto costiero, le tre bocche di Lido, Malamocco e Chioggia e i territori lagunari che si estendono dalle bocche fino alle zone più interne della laguna, è costituito da 98.433 maglie triangolari e da 51.724 nodi, come è visibile in figura 4.1.

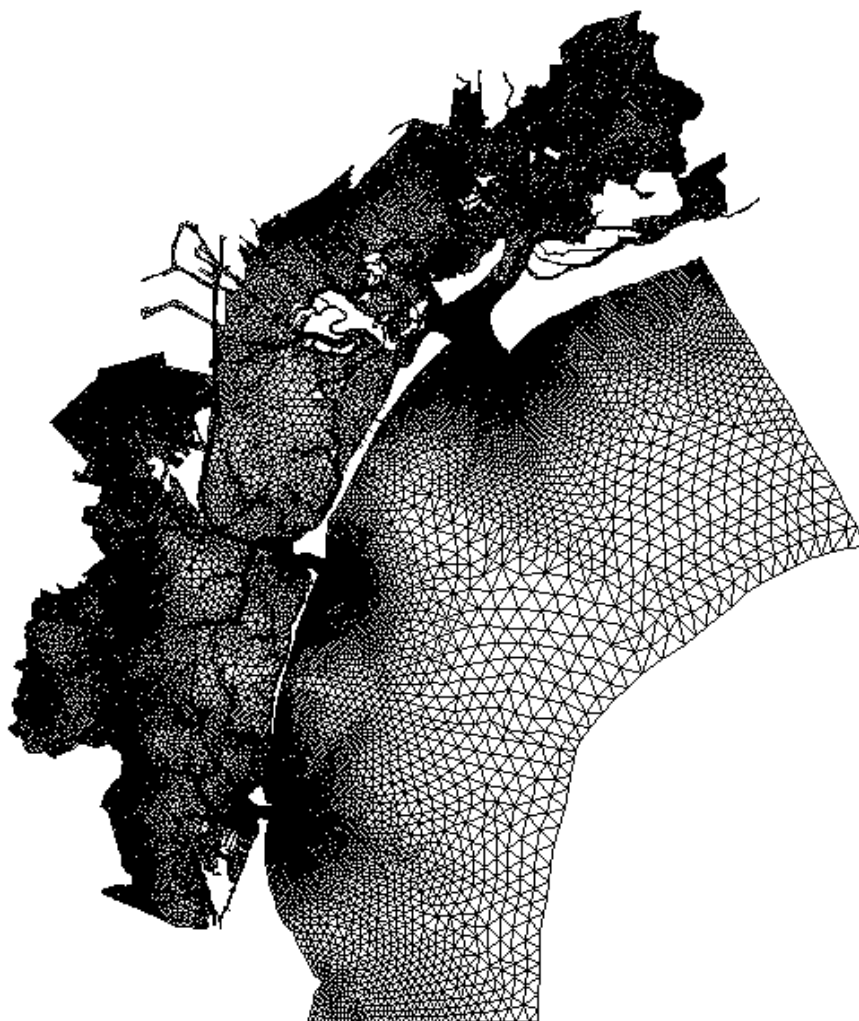


Figura 4.1: Dominio di calcolo.

I riquadri 4.2 e 4.3 mettono in evidenza due particolari, rispettivamente la bocca di Lido e di Malamocco. Da questi dettagli è possibile osservare il grado d'affinamento della mesh, molto più spinto per la rappresentazione dell'ingresso in laguna, dove si attendono più intensi gradienti di velocità e dove, quindi, un maggiore dettaglio

equivale ad un sensibile miglioramento nella stima delle caratteristiche del moto. Il grado d'affinamento è, invece, meno elevato per le maglie poste in mare aperto e nella parte più interna del bacino dove ci si aspettano variazioni più graduali delle condizioni di moto.

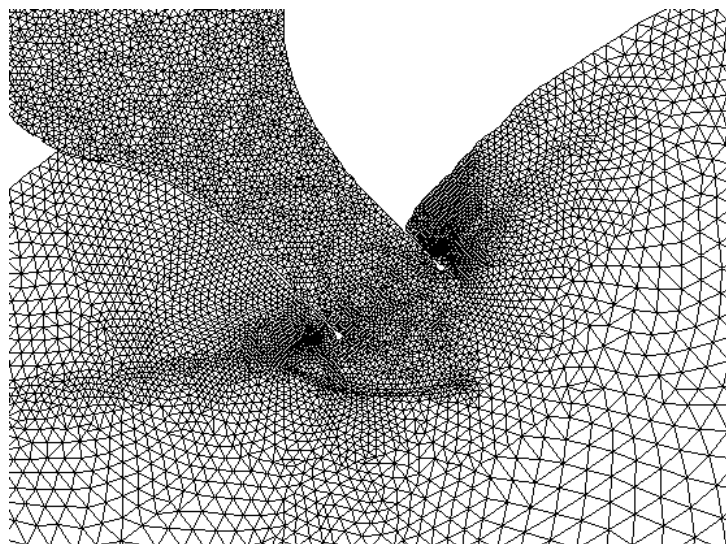


Figura 4.2: Particolare della mesh (bocca di Lido).

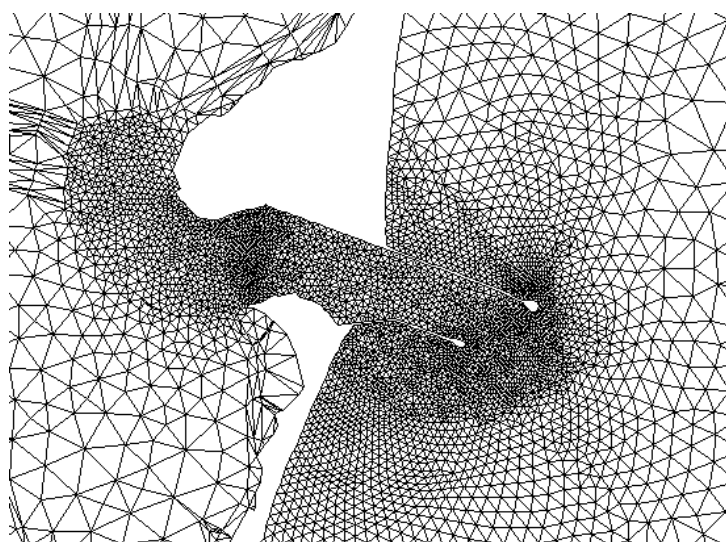


Figura 4.3: Particolare della mesh (bocca di Malamocco).

Definita la geometria planimetrica si procede a terminare la compilazione del file.geo con l'assegnazione ad ogni maglia del dominio degli ultimi parametri che completano la descrizione fisica del territorio. Essi sono: la quota del fondo (h_f

) rispetto al livello medio del mare (rappresenta il valore medio della maglia, cioè la quota del suo baricentro); il valore del coefficiente di Gauckler-Strickler (k_s); l'altezza caratteristica delle asperità del fondo (a_r) (è utilizzato per il calcolo della funzione η che permette di trattare in modo efficiente il passaggio dalla condizione di maglia asciutta alla condizione di maglia sommersa e viceversa).

Nella figura 4.4 sono rappresentati i valori di h_f , espressi in metri sopra il livello medio del mare, e si osserva che dalle tre bocche i canali si snodano e si ramificano, spingendosi nelle aree più interne del bacino, caratterizzate dalla presenza di molte terre emerse.

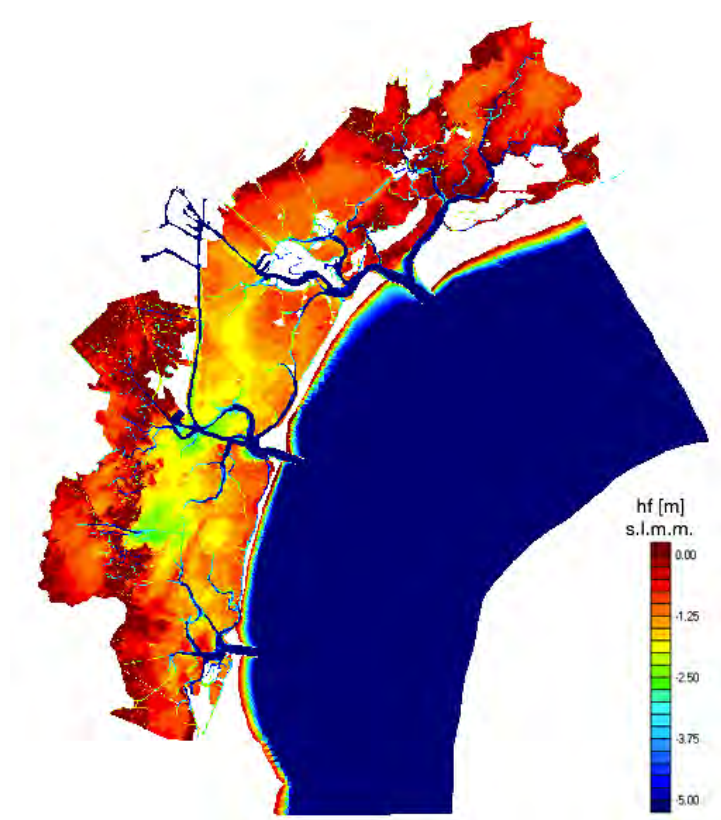


Figura 4.4: Quote del fondo.

La laguna può essere suddivisa principalmente in quattro zone: la laguna superiore, che, dalla bocca di Lido è posta a nord, la laguna centrale, posta tra la bocca di Lido e la bocca di Malamocco, la laguna posteriore, che comprende la zona industriale, e la laguna inferiore, posta nella parte sud.

Il colore rosso scuro evidenzia le aree più alte della laguna, le quali vengono allagate soltanto quando è presente l'alta marea. Queste zone, come rappresentato nella

figura 4.4, sono principalmente situate nella laguna superiore e posteriore.

Per dare evidenza ai gradienti di profondità che si realizzano nell'interno dell'area lagunare si è imposto il valore minimo di -5 metri alla scala di rappresentazione cromatica. Tale valore viene superato lungo i canali principali interni e in mare aperto.

Per il coefficiente di Strickler (vedi figura 4.5) si sono scelti cinque valori da assegnare alle maglie del dominio a seconda della loro posizione, in particolare si è posto:

- $k_s = 40 \text{ m}^{1/3}/s$ in mare aperto
- $k_s = 35 \text{ m}^{1/3}/s$ nei canali principali e in alcune aree della laguna centrale
- $k_s = 30 \text{ m}^{1/3}/s$ in gran parte del bacino
- $k_s = 20 \text{ m}^{1/3}/s$ in corrispondenza delle aree circostanti le barene
- $k_s = 15 \text{ m}^{1/3}/s$ in corrispondenza delle barene

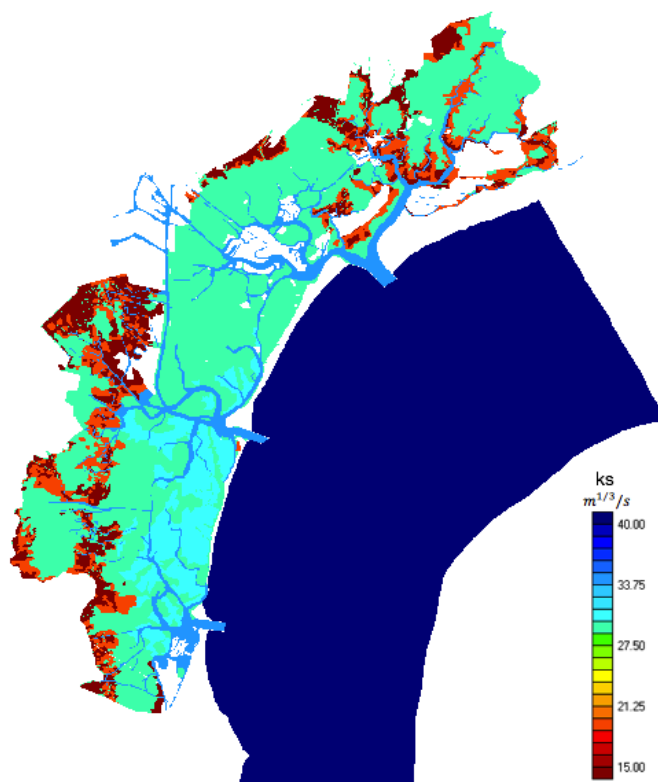


Figura 4.5: Distribuzione del coefficiente k_s .

Al parametro a_r si è dato un valore costante, pari a 0,3, per tutti gli elementi triangolari.

4.3 Condizioni al contorno e istruzioni di calcolo:file.sim

Il file .sim, assieme al file .geo, costituiscono l'input per il modello di calcolo. Si tratta di un semplice file di testo attraverso il quale, rispettando una prestabilita formattazione, è possibile impartire istruzioni al software circa le modalità di calcolo e le condizioni al contorno da imporre al problema. Di seguito si descrive la struttura e, nei suoi tratti fondamentali, la modalità di compilazione di questo file:

- i dati generali della simulazione nei quali si definiscono, innanzitutto, il passo temporale di stampa dei risultati espresso in secondi (dt) e la possibilità o meno di poterlo visualizzare sul video (1/0). E' richiesta, poi, l'indicazione del nome del file .geo su cui operare la simulazione e del file .out che conterrà i risultati; infine si inserisce la durata della simulazione e il passo temporale di integrazione, entrambi espressi in secondi.

Si è scelto di eseguire simulazioni ripetute della durata di 60 giorni, e per contenere le dimensioni del file.out queste vengono divise in una successione dei primi 30 giorni e poi dei secondi 30 giorni. Si è utilizzato un passo di calcolo di 2 secondi e di stampa delle variabili di 1800 secondi. Inoltre, poiché viene considerata un'idrodinamica periodica, per non appesantire i calcoli, il campo di moto idrodinamico non viene calcolato in ogni simulazione, ma viene caricato da un file .out che viene letto a ripetizione durante la simulazione

- la lista delle variabili da stampare in cui si definiscono i parametri, calcolati dal modello, che si vuole vengano riportati nel file di .out, quali ad esempio i livelli, le portate, l'altezza dell'onda, la concentrazione, le curvature

Per l'analisi che si deve svolgere le grandezze scelte sono: i livelli, le portate e le concentrazioni nodali relative al trasporto e alla diffusione.

- le condizioni iniziali tra le quali è possibile definire un livello iniziale del bacino, così come caricare i risultati di una precedente simulazione da utilizzare come condizioni di partenza. In quest'ultimo caso è necessario indicare il nome del file .bup che contiene tali informazioni (questo file viene creato automaticamente al termine di ogni simulazione assieme al file .out) Nel caso in esame si è attribuito al dominio un livello iniziale di 0,5m o -0,5m a seconda che si stia considerando il caso di marea inizialmente uscente dal ba-

cino lagunare o mare inizialmente entrante (come si vedrà in seguito questa differenza porterà a delle considerazioni sui risultati ottenuti)

- le tabelle dei dati variabili nel tempo, a passo temporale costante. Si riportano nel .sim i parametri (livello, portata o scala delle portate,..) per i quali, a seconda del problema trattato, risulti necessario imporre condizioni al contorno sui nodi di confine del dominio. E' necessario stabilire il numero delle tabelle che si andranno ad inserire (prima riga), quindi si definisce il passo temporale di lettura dei valori della prima tabella, il numero totale di parametri in essa contenuti e un nome per la stessa (seconda riga), infine si inseriscono in sequenza tutti i valori separati da spaziatura. Si ripete il procedimento per ogni tabella prevista

Nel caso in esame ci si è serviti di una sola tabella che impone le concentrazioni a mare nulle

- le condizioni al contorno. Vengono indicati, a questo punto, i nodi del dominio di calcolo, così come numerati nel file .geo, sui quali applicare le condizioni al contorno definite dalle tabelle del punto precedente. Si procede immettendo il numero complessivo di nodi associati ad una determinata tabella/condizione al contorno (prima riga), quindi, su colonne separate, il numero identificativo del nodo e il numero identificativo della tabella associata. Si compiono questi passaggi per ciascuna tabella precedentemente definita
- dati relativi al vento, dati relativi all'infiltrazione, dati relativi al trasporto solido, dati relativi al moto ondoso.

Nel modello è prevista la possibilità di calcolare anche questi fenomeni (1/0), ma nel presente lavoro non sono oggetto di indagine

- nell parte relativa ai dati per il trasporto e la diffusione si specifica se si vuole calcolare la diffusione (1/0) e il relativo file .out in caso affermativo. Vengono poi indicati i nodi del dominio di calcolo, così come numerati nel file .geo, sui quali applicare le condizioni al contorno relative alle concentrazioni, definite dalle tabelle citate prima. Si procede come al punto precedente immettendo il numero complessivo di nodi associati ad una determinata tabella (prima riga) e poi, su colonne separate, il numero identificativo del nodo, il numero

identificativo della tabella associata e un coefficiente amplificativo, posto pari ad 1.

E' quindi in questa parte che si inserisce l'.out dell'idrodinamica lagunare e i 105 nodi (vedi figura 4.6) sui quali è imposta la condizione al contorno relativa alle concentrazioni fisse e ai livelli di marea imposti.

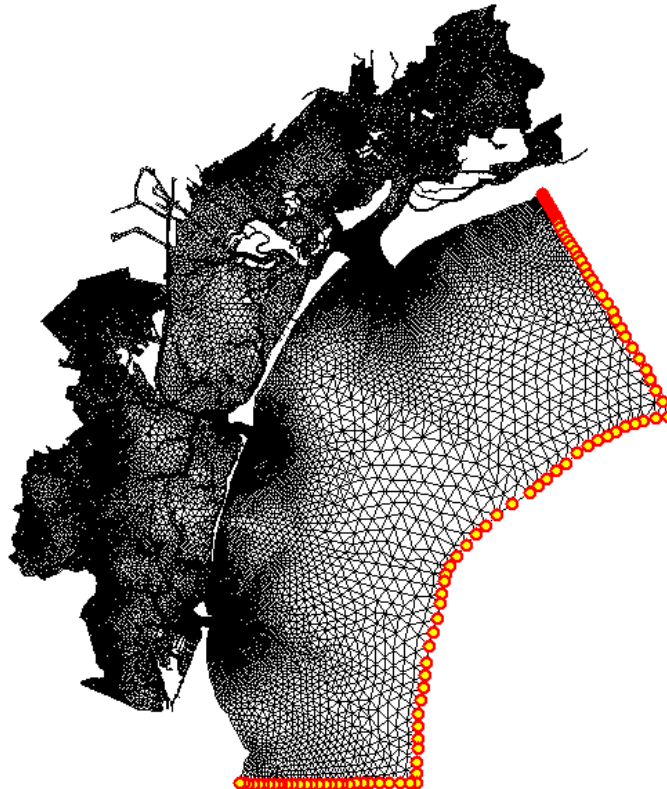


Figura 4.6: Nodi nei quali sono applicate le condizioni al contorno.

Per simulare l'onda di marea si è scelto di imporre un livello variabile nel tempo sui nodi di confine del dominio lato mare, secondo l'andamento sinusoidale riportato in figura 4.7, per quattro cicli di marea.

Operativamente il fenomeno, della durata di 48 ore, è stato descritto con un totale di 97 valori di input con un passo temporale di 1800 secondi (mezz'ora); il primo valore della tabella si intende applicato al tempo $t = 0$ s. L'equazione che rappresenta il fenomeno è la seguente:

$$h = A \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (4.5)$$

dove:

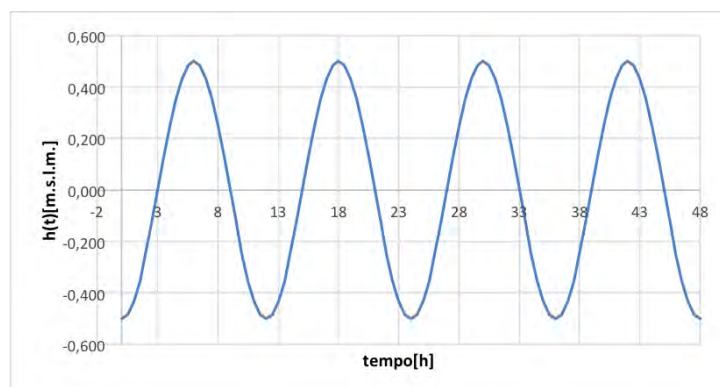


Figura 4.7: Andamento dei livelli imposti.

- h = livello dell'acqua
- A = semi ampiezza dell'onda di marea = 0,5 m
- t = timestep
- T = periodo della marea semi diurno = 12h

4.4 Risultati:file.out

I risultati delle simulazioni sono trattati e descritti nel capitolo successivo. In questo paragrafo si vuole tuttavia descrivere operativamente come si sono utilizzati i files .out. Bisogna innanzitutto specificare che sono state eseguite due tipologie di simulazioni, che differiscono tra di loro per la concentrazione in mare, che in un caso viene mantenuta costantemente nulla, nell'altro può variare liberamente. Ciascuno di questi due scenari viene indagato nel caso di marea inizialmente entrante (livello iniziale a -0,5m) o inizialmente uscente (livello iniziale a +0,5m).

Il file .out riporta i risultati del modello e, grazie ad Incidenze, aprendo prima il file .geo e poi l'.out dei risultati, è possibile visualizzarli nel dominio in istanti definiti oppure in sequenze animate.

Il file.out che viene generato contiene contemporaneamente indicazioni sui livelli presenti, sulle portate nonché sulle concentrazioni nodali. Attraverso l'utilizzo di un programma fornito dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova, si è costruito, a partire dall'.out ottenuto, uno ulteriore contenente solamente indicazioni relative alle concentrazioni e alle portate volumetriche di soluto. Questo file così ottenuto risulta molto utile per la determinazione delle portate di soluto in transito alle bocche di porto.

Poiché l'andamento delle concentrazioni nel tempo presenta un andamento oscillante, dovuto all'azione alternata della marea, i valori relativi alle concentrazioni nodali ottenuti precedentemente sono stati mediati su ogni ciclo di marea: si ottiene così un altro .out che fornisce a passo temporale di 0,5 giorni l'andamento nel tempo della concentrazione mediata in un ciclo di marea, detta concentrazione intermareale.

Riguardo al tempo di residenza, esso è definito come l'istante nel quale la massa di soluto all'interno della laguna all'istante t e , normalizzata rispetto a quella all'istante iniziale t_0 , scende sotto la soglia $1/e$. Allo stesso modo, il tempo di ricambio locale T_f è calcolato come l'istante nel quale la concentrazione intermareale locale raggiunge il valore $1/e$ rispetto alla suo valore iniziale.

Capitolo 5

Applicazione del modello alla laguna di Venezia

In questo capitolo vedremo come il modello numerico è stato applicato al caso di studio della laguna di Venezia, al fine di determinare il tempo di ricambio, sia a livello locale che globale, e come questo possa essere influenzato dai processi di mescolamento tipici del dominio di studio analizzando l'andamento nel tempo dei volumi di soluto, o tracciante, presenti in laguna.

5.1 Modello applicato

Le simulazioni effettuate coprono un intervallo di tempo complessivo di 60 giorni: questo tempo risulta essere sufficiente per determinare il tempo di ricambio in maniera precisa. Da un punto di vista pratico si è utilizzata una mesh avente ≈ 51700 nodi e ≈ 98500 maglie triangolari, contenente anche una porzione del Mar Adriatico settentrionale.

Le condizioni al contorno per il modello idrodinamico sono i livelli imposti lungo il contorno aperto del Mar Adriatico; lungo lo stesso contorno è imposto anche un valore fisso della concentrazione, in questo caso pari a zero, per tutta la durata della simulazione.

Con questo modello è stato determinato il tempo di ricambio con una marea di ampiezza fissa di $0.5m$ e un periodo di $T = 12h$, tipico per questo tipo di mare (vedremo in seguito anche elaborazioni di dati ottenuti per una marea avente ampiezza di $0.3m$ e un periodo di $T = 12h$).

Sono state eseguite simulazioni per due scenari diversi: nel primo la concentrazio-

ne in mare, imposta pari a zero come condizione al contorno, è lasciata libera di variare nel tempo; nel secondo la concentrazione in mare ad ogni istante di calcolo viene imposta pari a zero. Questo secondo scenario viene indagato per poter determinare il tempo di ricambio in assenza di flusso di ritorno, assumendo quindi che nessuna frazione del soluto fuoriuscito possa rientrare nel ciclo successivo. Quest'ultima condizione equivale ad imporre un fattore di ritorno $b=0$.

Per entrambi gli scenari sono state eseguite delle simulazioni partendo da situazioni inizialmente di alta marea o di bassa marea, in modo da indagare l'impatto che può avere la diversa fase mareale.

In ogni scenario si ottiene l'andamento del rapporto C/C_0 in funzione del tempo: imponendo però che in laguna ci sia una concentrazione iniziale unitaria e in mare nulla, ciò che si ottiene diventa l'andamento di C nel tempo (C_0 è così unitaria).

Operativamente a questo punto si è utilizzato un programma fornito dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova che, insieme, calcola l'andamento della concentrazione intermareale, mediata cioè sulla marea, e unisce gli .out risultati dalle simulazioni, in modo da ottenere un file .out comprensivo delle concentrazioni intermareali dei 60 giorni di simulazione.

In un secondo momento ci si serve di un altro programma fornito dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova che, utilizzando come input il file .out complessivo appena creato, applica la definizione del tempo di ricambio per i punti dove si è raggiunta la soglia $1/e$ e fornisce come output un file .bup contenente il tempo di ricambio locale nell'intero dominio.

Inoltre, utilizzando le portate volumetriche di soluto (definite come il prodotto della portata liquida per la concentrazione), è possibile determinare l'andamento delle portate alle bocche nonché determinare, per ogni scenario, il tempo di ricambio relativo all'intera laguna.

5.2 Tempo di ricambio locale: Incidenze

Si vuole ora indagare i risultati ottenuti per il tempo di ricambio nella laguna di Venezia; l'analisi fatta utilizza un modello che considera la diffusione.

Come già introdotto nel paragrafo 5.1 il modello calcola l'andamento nel tempo della concentrazione ed essendo questa legata al tempo di ricambio lo si può ottenere in maniera univoca.

Le simulazioni effettuate riproducono quattro scenari completamente diversi:

1. marea entrante
2. marea entrante con imposizione di C_{mare} pari a zero
3. marea uscente
4. marea uscente con imposizione di C_{mare} pari a zero

Per ogni scenario è stato possibile determinare l'andamento della concentrazione nel tempo. Per avere, però, dei risultati depurati dall'onda di marea, cioè un andamento intermareale della concentrazione, ovvero facendo la media sulla marea, si è utilizzato il programma illustrato nel paragrafo 5.1, il quale oltre a mediare sulla marea permette di raggruppare le simulazioni in un unico file .out. Si vuole infine calcolare il tempo di residenza utilizzando un programma che applicando la definizione rileva l'istante in cui il rapporto C/C_0 raggiunge la soglia $1/e$ e crea un file .bup contenente i tempi di residenza dell'intero dominio di calcolo.

In figure 5.1 e 5.2 si riporta l'immagine ottenuta con Incidenze del file .bup creato in questo modo, contenente i tempi di residenza della laguna di Venezia.

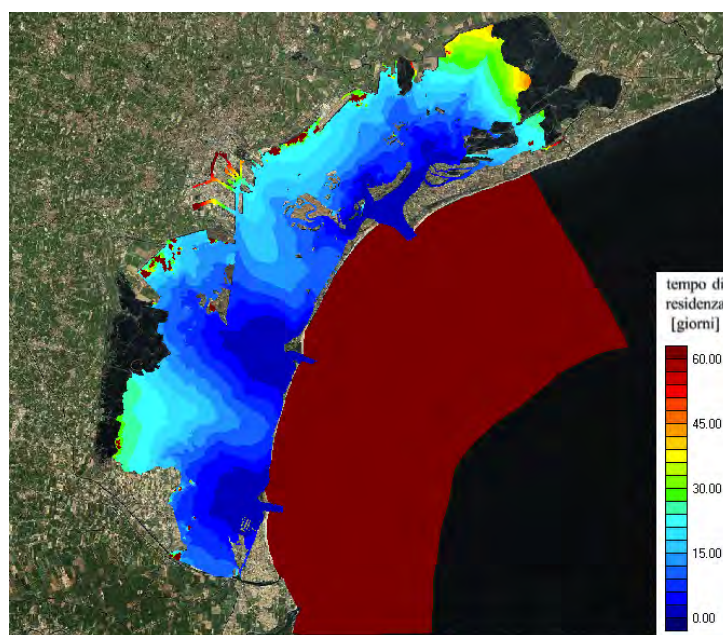


Figura 5.1: Tempo di residenza locale per marea 0,5m inizialmente entrante.

Per i punti più vicini alle bocche l'oscillazione mareale è notevole, entrando questa dalle aperture senza ostacoli, mentre allontanandosi la marea risulta alquanto smorzata: ciò è dovuto principalmente alla resistenza al moto che il flusso incontra nel suo percorso per la presenza delle superfici barenali. Si osserva che più ci si allontana dalle bocche di porto più il tempo di ricambio aumenta, ovvero meno il

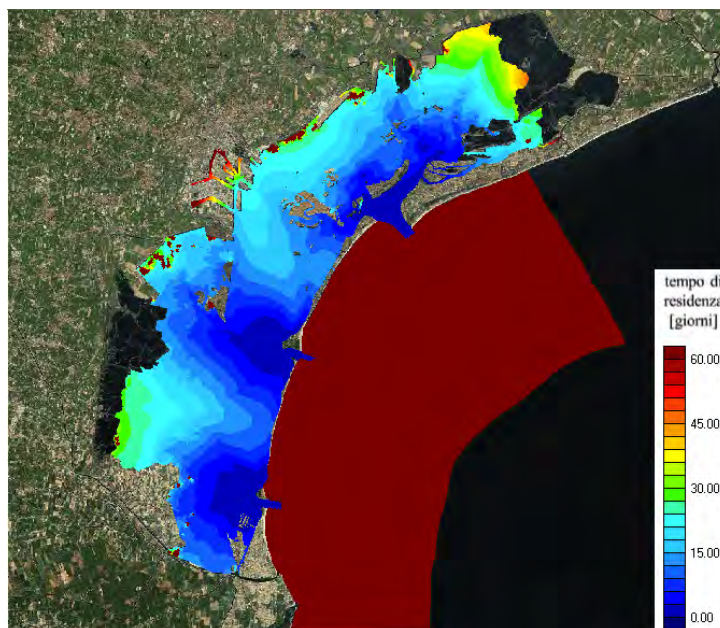


Figura 5.2: Tempo di residenza locale per marea $0,5m$ inizialmente uscente.

mescolamento tra le particelle contribuisce a ridurre il parametro.

Vicino alle bocche, infatti, il ricambio d'acqua è più elevato e il mescolamento con particelle d'acqua di mare aventi concentrazione pari a zero è più efficiente. Si vede in questo modo che il contributo del fattore legato al "mixing" è di grande importanza e influenza nella definizione del tempo di ricambio.

5.3 Portate di soluto

Analizziamo ora brevemente l'andamento delle portate volumetriche di soluto nel caso in cui la marea abbia ampiezza pari a $5m$.

Grazie al programma fornito dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova, oltre a conoscere l'andamento nel tempo della concentrazione per ogni punto della laguna, è possibile ricavare anche l'andamento delle portate volumetriche di soluto in qualsiasi sezione nel dominio di calcolo. Da questo dato, utilizzando un file.cnt relativo alle tre sezioni delle bocche di porto in Incidenze, si può ricavare l'andamento delle portate di soluto in transito alle bocche (Lido, Malamocco, Chioggia). Differenziando le portate entranti da quelle uscenti attraverso l'utilizzo di una macro in Excel, si vede così l'andamento nei 60 giorni di simulazione del volume di soluto per ognuna delle bocche e per ogni ciclo di marea: nei grafici 5.3 e 5.4, dove si vede lo scenario 1 in cui la concentrazione fuori laguna è libera di variare e lo

scenario 2 in cui invece è fissata a zero. Negli stessi grafici viene riportato anche il rapporto tra $\frac{V_{in}}{V_{out}}$.

Confrontando i diversi scenari, si vede come nel caso di imposizione di concentrazione in mare nulla, il volume entrante di soluto dalle tre bocche si mantiene nullo. All'istante iniziale delle simulazioni il volume di soluto che fuoriesce dalla laguna equivale al volume di acqua presente in laguna, questo perchè essendo $C_0 = 1$, la portata di soluto coincide con la portata d'acqua e questo risulta essere molto più pronunciato nel caso di marea uscente.

Sempre nel caso di marea uscente (figure 5.4) si può osservare che il rapporto $\frac{V_{in}}{V_{out}}$ è maggiore di zero per $t = 0$ perchè l'acqua entra in laguna solo dopo che parte del soluto è già fuoriuscito da essa. Tuttavia, nel caso di marea inizialmente uscente, la capacità di ricambio dell'acqua nella laguna da parte di quella nel mare è più elevata, per il fatto che inizialmente esce una cospicua frazione di soluto, e ciò si traduce in tempi di ricambio minori rispetto al caso di marea uscente.

Concludendo si può affermare che, come visualizzato nei grafici 5.3 e 5.4, la fase della marea di studio influenza in maniera significativa l'andamento nel tempo dei volumi di soluto transitanti per le tre bocche di porto, e quindi non è possibile trascurarla.

5.4 Tempo di ricambio globale

Un altro dato che è possibile ottenere dalle simulazioni effettuate è l'andamento nel tempo del volume di tracciante presente in laguna (e in mare).

Questo dato è estremamente importante perchè da esso è possibile ricavare un valore del tempo di residenza relativo all'intera laguna, applicando la sua definizione più semplice come espressa nel capitolo 2.2.

I valori ottenuti per i quattro scenari (sia per una marea di ampiezza di 0,3m che di 0,5m) sono espressi nella tabella 5.1.

	$T_r[\text{giorni}]$			
	Entrante	Entrante <i>Czero</i>	Uscente	Uscente <i>Czero</i>
Marea 0,3m	21,5	17,7	16,2	12,4
Marea 0,5m	11,5	9,7	7,3	5,8

Tabella 5.1: Tempo di ricambio per marea con ampiezza di 0,3m e 0,5m

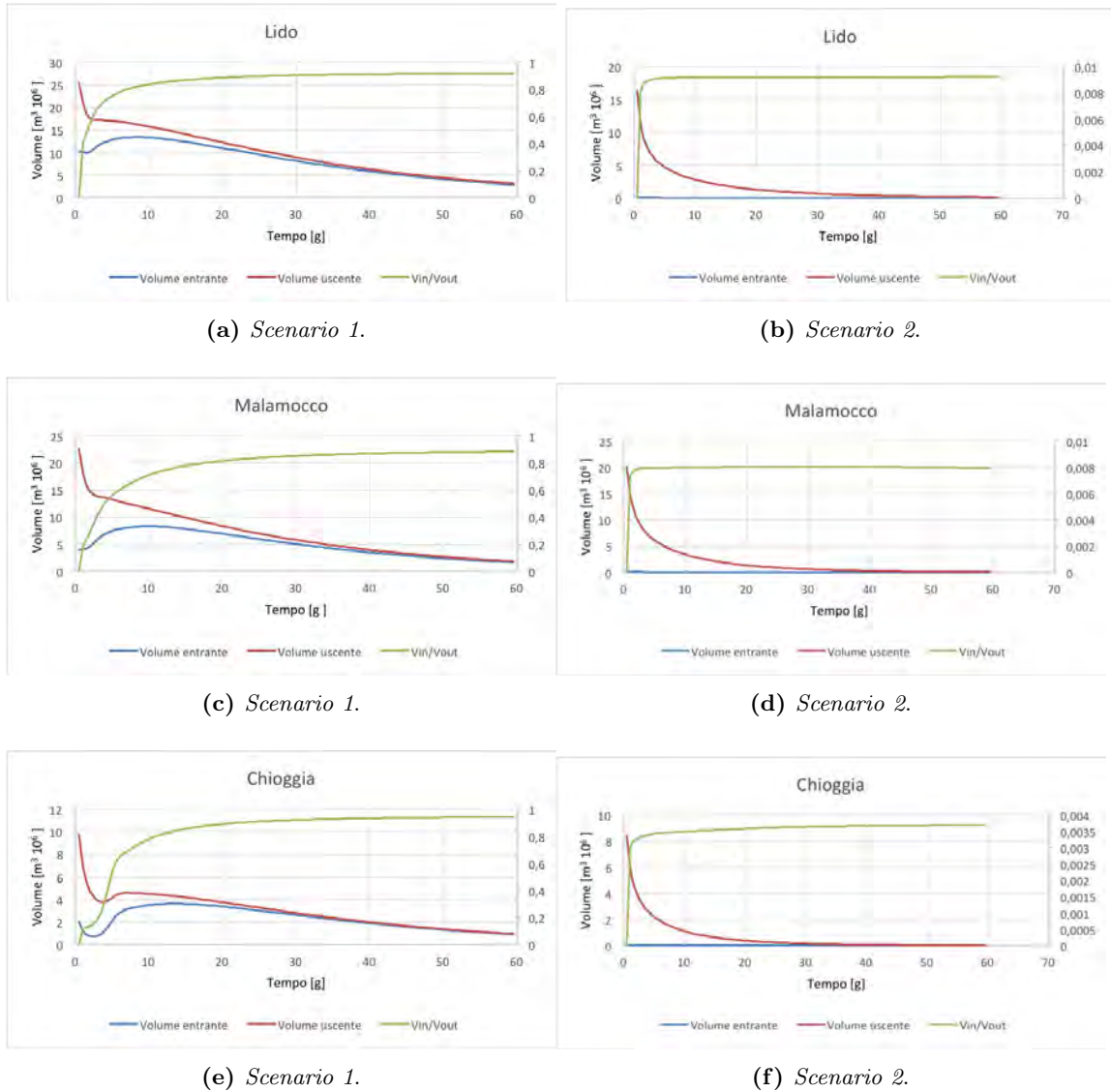
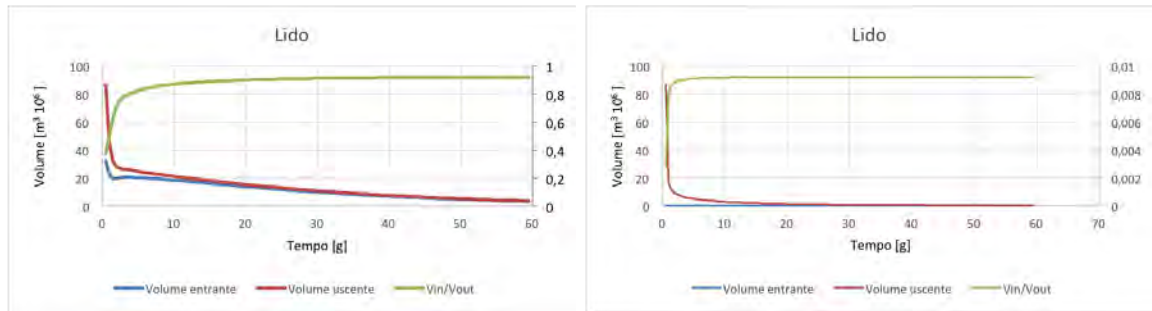
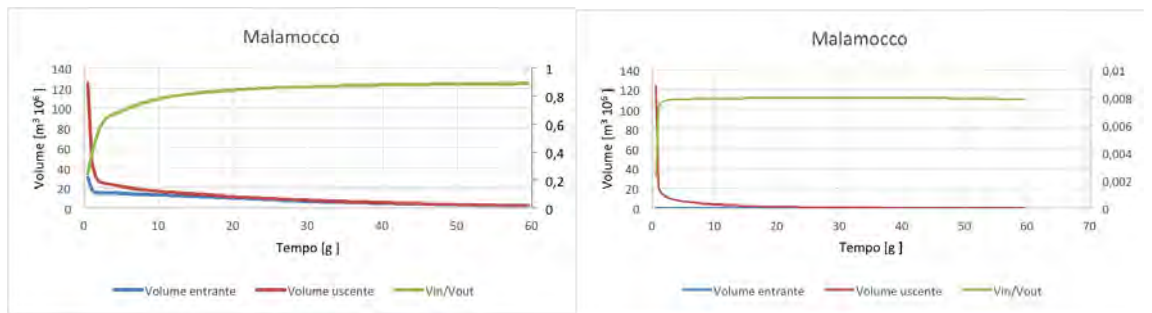


Figura 5.3: Andamento dei volumi di soluto per ogni bocca nel caso di marea entrante.



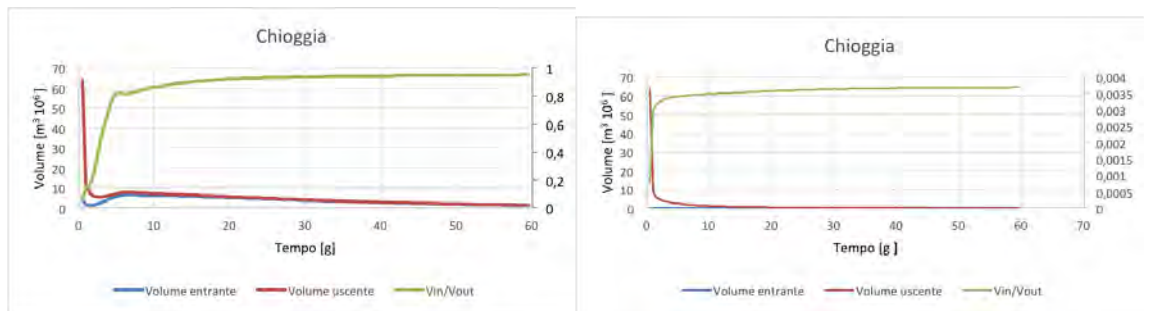
(a) Scenario 1.

(b) Scenario 2.



(c) Scenario 1.

(d) Scenario 2.



(e) Scenario 1.

(f) Scenario 2.

Figura 5.4: Andamento dei volumi di soluto per ogni bocca nel caso di marea uscente.

Si vede chiaramente da questo confronto che l'ampiezza della marea è significativa nel determinare il tempo di ricambio globale: più questa è grande più la capacità del mare di ripulire la laguna aumenta.

In entrambi i casi se la marea è uscente il tempo di ricambio è più piccolo rispetto a quella entrante, ovvero la concentrazione del tracciante presente in laguna raggiunge in minor tempo la soglia $1/e$; ciò è dovuto al fatto che nel primo ciclo di marea la quantità di soluto che esce dalla laguna, sebbene in quelli successivi parzialmente rientri, è molto più elevata nel caso in laguna ci sia situazione di alta marea (livello di partenza $+0,5 m$).

Si può osservare che nel caso di imposizione di concentrazione nulla in mare per ogni ciclo di marea, il tempo di ricambio risulta essere minore rispetto al caso di variazione libera: questo perché ogni 12 ore l'acqua che entra in laguna viene "forzatamente" ripulita e quindi, mescolandosi con quella in laguna, ha un'azione diluente maggiore (il "return factor" b viene infatti ad annullarsi).

5.4.1 Fattore di ritorno b

Il fattore di ritorno b rappresenta quella porzione di acqua che uscita dalla laguna ritorna in essa nella successiva fase del ciclo di marea.

Nel capitolo precedente 5.3 si è separato il volume entrante di soluto da quello uscente per ogni bocca di porto e, noto questo, è possibile ricavare il valore (da modello) dell'andamento di b , sia per ogni bocca di porto che a livello complessivo, ottenuto calcolando il valore medio della portata di soluto delle tre aperture pesato su ogni ciclo di marea.

I risultati ottenuti per le due ampiezze di marea sono riportati di seguito: in figura 5.5 sono esposti i valori di b nel tempo per ogni bocca, mentre nei grafici di figura 5.6 si può vedere il parametro cumulativo (per l'intera laguna).

Si nota che, come è stato già detto, nel caso di concentrazione mareale imposta nulla il fattore di ritorno è nullo, sia nel caso di marea entrante che in caso di marea uscente.

Per gli altri casi, invece, il fattore b varia in maniera significativa, soprattutto nei primi 30 giorni di simulazione, per poi tendere verso un valore quasi costante. Questo comportamento del parametro nella fase finale delle simulazioni è dovuto al fatto che alla fine dei 60 giorni di fatto si è raggiunta una condizione quasi di "regime", e ciò che esce dalla laguna rientra quasi interamente.

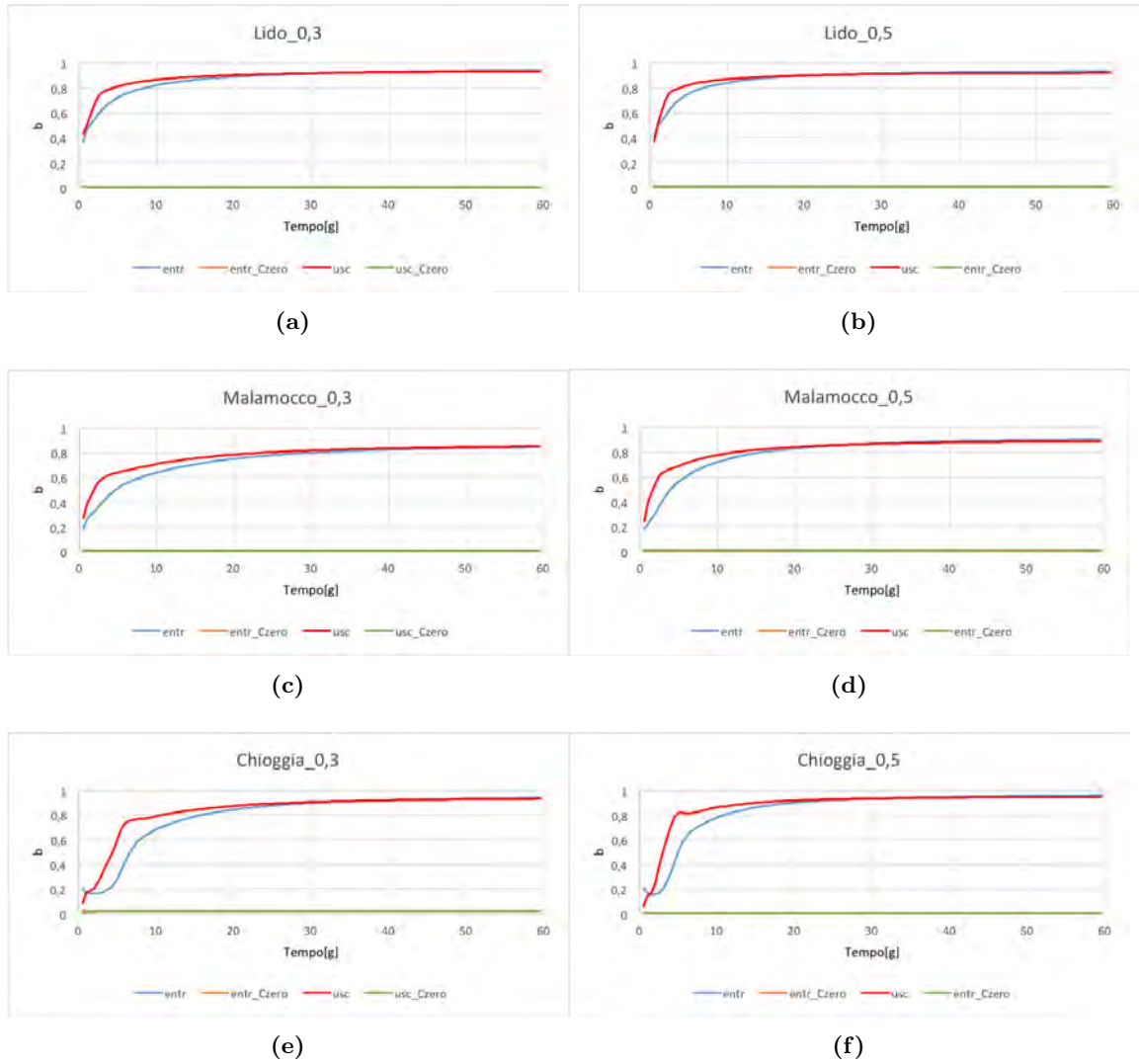
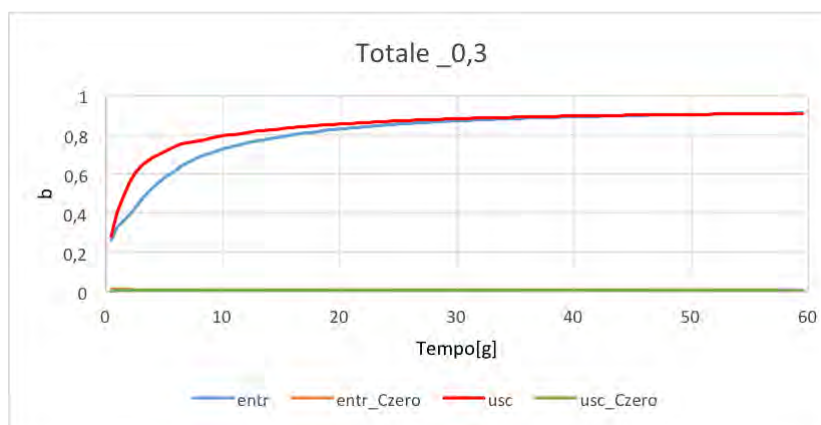
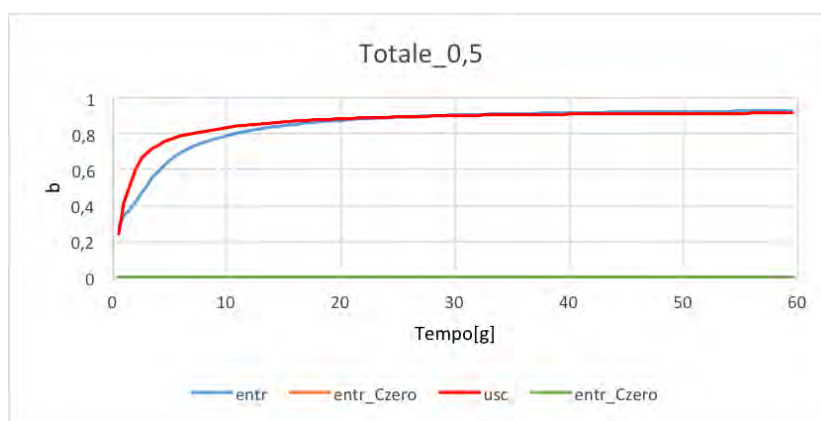


Figura 5.5: Andamento del fattore di ritorno b per ogni bocca di porto.



(a)



(b)

Figura 5.6: Andamento del fattore di ritorno b cumulativo (per l'intera laguna).

Nella fase iniziale, invece, assumere un valore in qualche modo costante di b causerebbe un'errata interpretazione dei fenomeni di scambio mare-laguna.

5.4.2 Fattore di mescolamento ξ

Il fattore di mescolamento è definito come:

$$\xi(t) = c_e(t)/c(t)$$

dove $c_e(t)$ è la concentrazione di tracciante nel flusso uscente, cioè di fatto la concentrazione all'interno del bacino in prossimità della sezione di confine tra il bacino e il mare, e $c(t)$ è la concentrazione media in laguna. Il valore così definito viene ottenuto da modello, sempre attraverso la conoscenza dell'andamento nel tempo dei volumi di soluto, in laguna e alle bocche.

Concentrazione in mare nulla ($b=0$)

Nel caso di concentrazione in mare mantenuta pari a zero, si è visto che il fattore di ritorno b è nullo (paragrafo 5.4.1), quindi è possibile, noto il prisma di marea P , il volume in laguna V , il periodo dell'onda di marea T , e il tempo di ricambio che in questo caso chiameremo RT , ottenere una stima complessiva del parametro ξ semplicemente invertendo la formula del modello basato sul prisma di marea :

$$RT = \frac{VT}{\xi_0 P} \implies \xi_0 = \frac{VT}{RTP} \quad (5.1)$$

Facendo questa operazione è possibile ottenere una sorta di valore medio sul tempo di ξ . Da modello, invece, si può ricavare l'andamento di ξ nel tempo invece, rapportando le concentrazioni necessarie calcolate a partire dai dati in possesso. I valori ottenuti nei due modi, per marea di $0,3m$ e $0,5m$, nel caso questa sia inizialmente entrante o inizialmente uscente, sono raffigurati in figura 5.7.

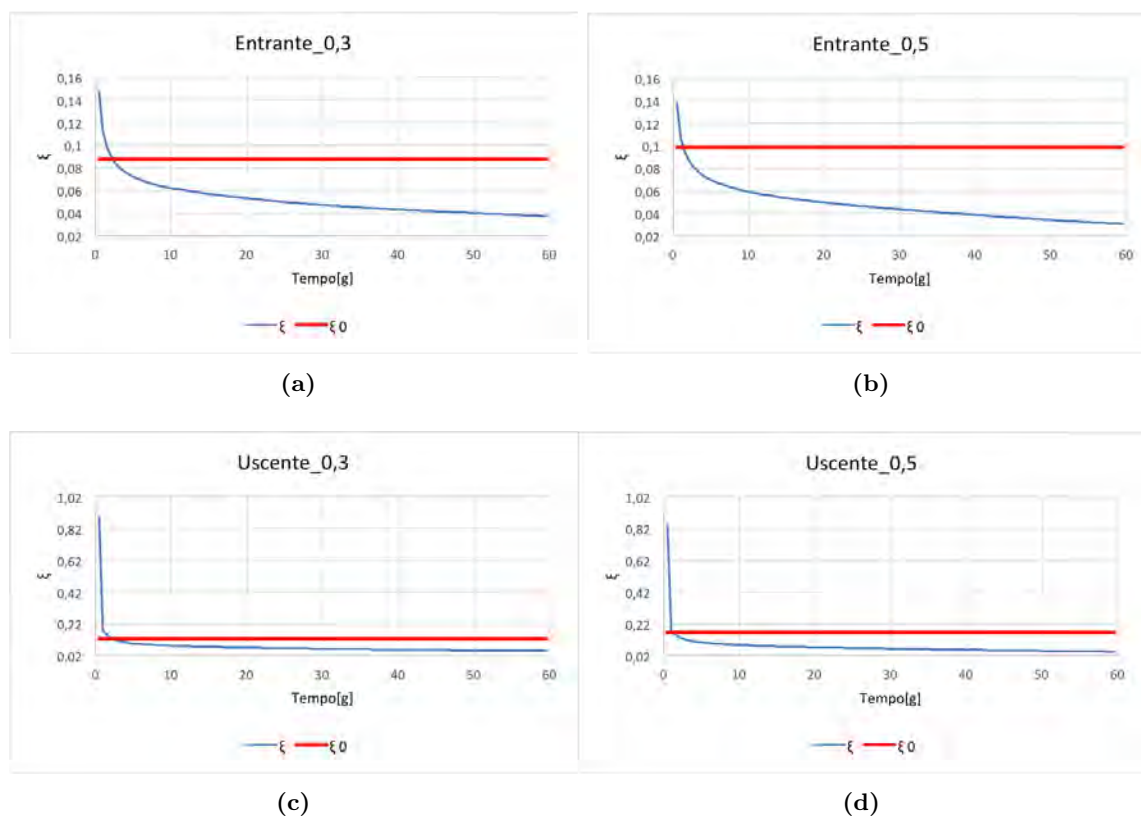


Figura 5.7: Confronto tra parametro ξ calcolato da modello (blu) e dalla formula invertita del *tidal prism model* (rosso).

Come si può notare ξ_0 è maggiore nel caso di marea con ampiezza maggiore, quindi ne è indubbiamente influenzato, come è maggiore nel caso di marea uscente rispetto al caso di marea entrante.

Quindi nel caso in cui $b = 0$, si può dire che se la marea è inizialmente uscente, cioè stiamo partendo da una situazione di alta marea in laguna, l'efficienza di mescolamento aumenta e perciò, come si vede in tabella 5.1, il tempo di ricambio risulta minore (sebbene la quantità di soluto in laguna sia maggiore).

Se nel modello basato sul prisma di marea non si tenesse conto dell'influenza del mescolamento nella determinazione del tempo di ricambio, sicuramente si commetterebbe un errore significativo: confrontando i valori ottenuti da modello, il tempo di ricambio sarebbe largamente sottostimato. Nonostante queste considerazioni, è difficile determinare in che modo possa essere relazionato ξ_0 a ξ calcolato da modello.

Concentrazione in mare variabile ($b \neq 0$)

Per lo scenario in cui la concentrazione in mare viene lasciata libera di variare le cose si complicano: sebbene la definizione di ξ nella teoria rimanga invariata, applicando il modello prisma di marea, non potendo trascurare b , si ottiene che il tempo di ricambio, che chiameremo ET , diventa:

$$ET = \frac{VT}{\xi P(1-b)} \quad (5.2)$$

$$ET = \frac{RT}{(1-b)} \frac{\xi_0}{\xi}$$

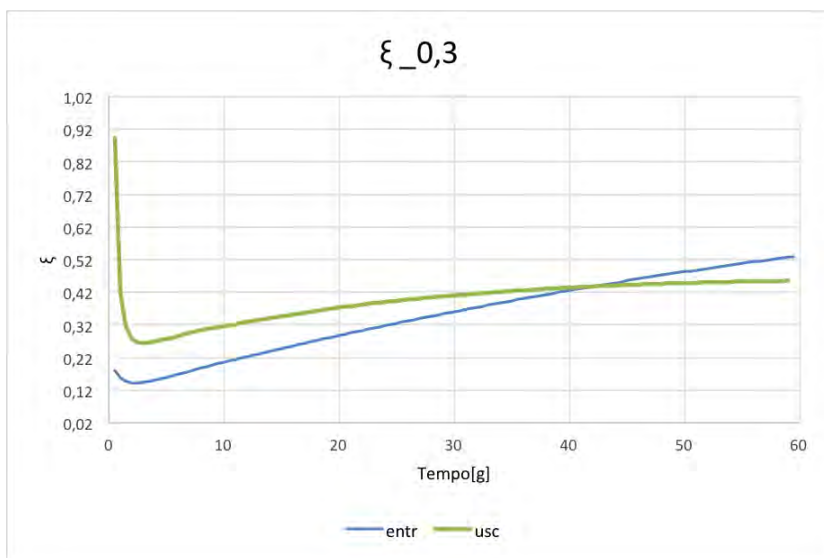
$$\frac{RT}{ET} = (1-b) \frac{\xi}{\xi_0} \quad (5.3)$$

chiamando $RT/ET = r$ si può scrivere che:

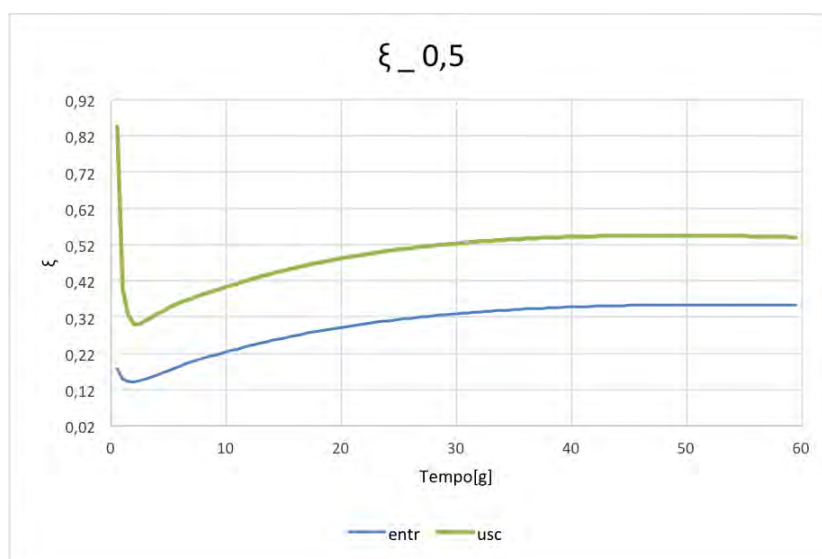
$$r\xi_0 = (1-b)\xi \quad (5.4)$$

Quindi di fatto dal modello è possibile determinare ξ , ma invertendo la formula del "tidal prism model" si ottiene un parametro che è funzione sia di ξ che di b . Si riporta qui di seguito i grafici che rappresentano l'andamento di fattore di mescolamento ricavati da modello (figura 5.8).

In figura 5.9 sono rappresentati gli andamenti del parametro $\xi(1-b)$ per i quattro casi e le due diverse maree: di fatto, essendo nel caso *Czero* il fattore di ritorno

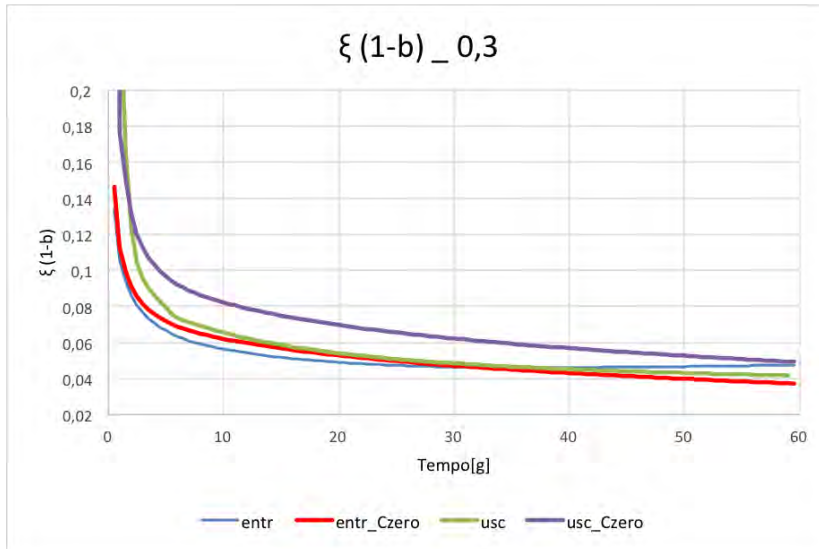


(a) Marea 0,3m.

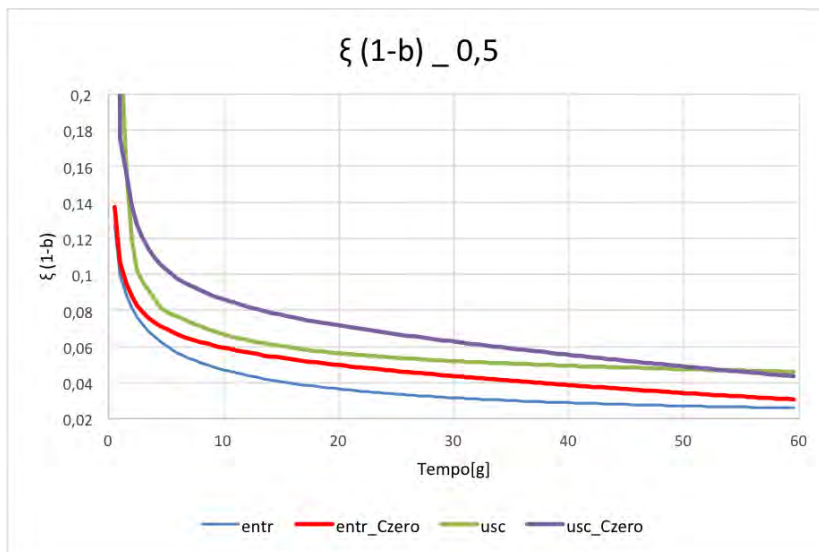


(b) Marea 0,5m.

Figura 5.8: Parametro ξ calcolato da modello.



(a) Marea 0,3m.



(b) Marea 0,5m.

Figura 5.9: Parametro $\xi(1-b)$ calcolato da modello.

nullo, si vede l'andamento di ξ . Sono stati tralasciati i valori agli istanti iniziali molto elevati e diversi nel caso di marea entrante ed uscente proprio per le diverse condizioni idrodinamiche di partenza. Si nota che il comportamento nel tempo differisce in maniera significativa sia per diversa marea che per tipologia di scenario.

Un altro confronto che può essere fatto è quello tra l'andamento nel tempo di $\xi(1-b)$ e lo stesso ottenuto dall'equazione 5.4, che può darci un'indicazione del comportamento globale del parametro nel tempo.

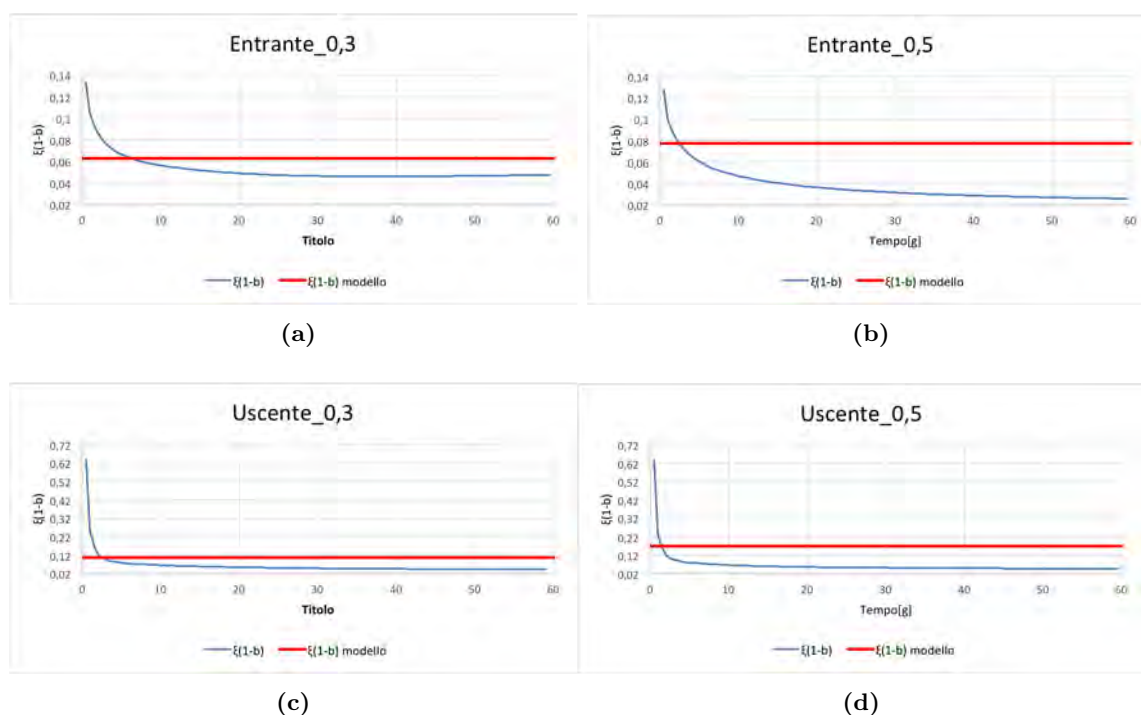


Figura 5.10: Confronto tra parametro $\xi(1-b)$ calcolato da modello (blu) e ottenuto dalla formula del *tidal prism model* (rosso).

Si vede nei grafici di figura 5.10 che anche in questo caso, come lo è stato per ξ , è difficile determinare quale tipo di relazione possa intercorrere tra i due andamenti.

5.4.3 Considerazioni sui parametri b e ξ

In letteratura ciò che viene fatto per determinare il tempo di ricambio è considerare il perfetto mescolamento nel bacino di studio e applicare l'espressione del modello basato sul prisma di marea tenendo in considerazione il solo fattore di ritorno.

Nel nostro caso, si è visto che trascurare il mescolamento può portare ad errate valutazioni.

Se per esempio non venisse considerato l'effetto della diversa capacità di mescolamento del bacino di interesse, ma si ipotizzasse un mescolamento perfetto, ovvero si tralasciasse l'effetto del parametro ξ , si vedrebbe che nel passare da

$$RT = \frac{VT}{P}$$

a

$$ET = \frac{VT}{P(1-b)} = \frac{RT}{(1-b)}$$

se per esempio $b = 0,5$ (come viene di fatto suggerito di assumere nel caso non si conoscano indicazioni precise sul comportamento della massa di tracciante uscente dal bacino), si vedrebbe che il rapporto $r = \frac{RT}{ET}$ da un valore pari a 0,5, ovvero ET dovrebbe essere il doppio (almeno) di RT .

Ciò che invece noi troviamo analizzando i nostri dati è che nel passare da RT a ET si ha un aumento del $\sim 20\%$, ovvero $r = 0,8$. Questo non sarebbe giustificabile senza ammettere l'effetto del "mixing".

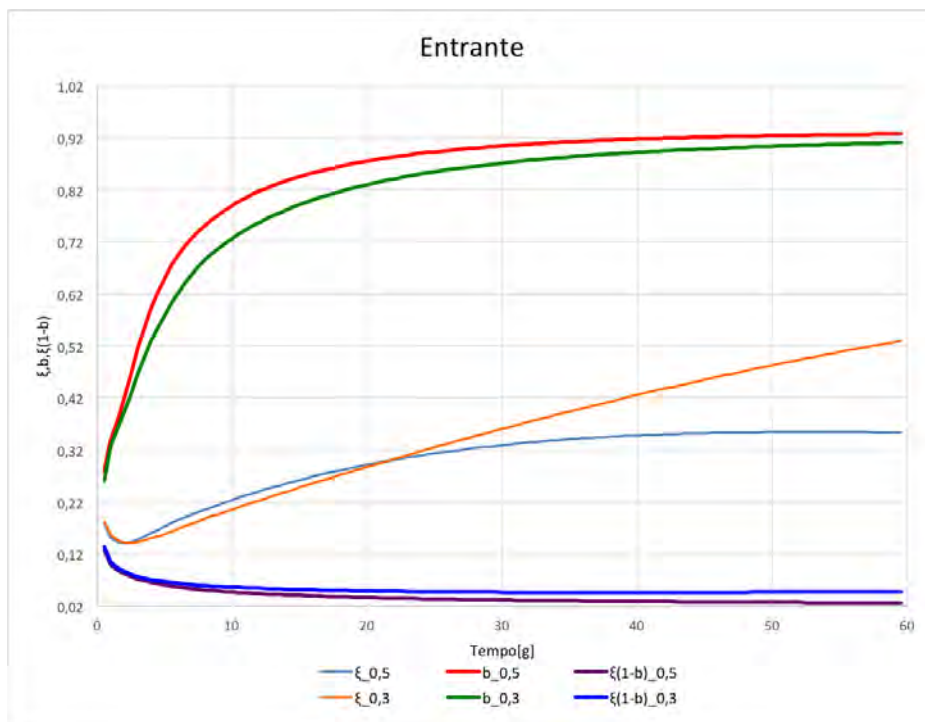
Dai grafici in figura 5.11 si può notare come il comportamento del fattore di ritorno e di mescolamento siano assai diversi nel caso di alta marea o bassa marea iniziale (cosa che influenza il valore del volume in laguna V), e all'interno dello stesso scenario variano significativamente anche per diversa ampiezza della marea, avendo addirittura comportamenti contrastanti come avviene nel grafico (a) per i valori di ξ .

Ciò che si può anche osservare è che il comportamento del parametro $\xi(1-b)$, invece, in entrambi i casi, sebbene b e ξ non siano confrontabili, risulta essere simile, sia per un tipo di marea che per l'altro.

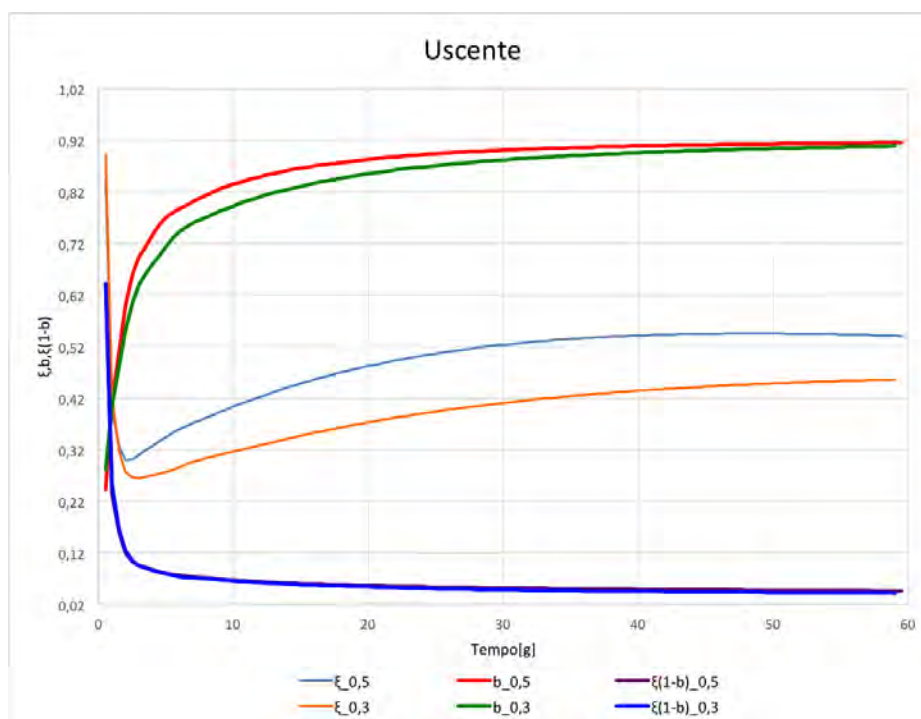
Nel caso di marea entrante (figura 5.11(a)) nelle fasi iniziali della simulazione l'andamento risulta pressoché uguale, mentre si discosta leggermente per le fasi terminali; ciò risulta di poca importanza dato che alla fine dei 60 giorni i volumi che vengono mobilitati sono assai modesti (vedi figure 5.3 e 5.4).

Nel caso di marea uscente (figura 5.11(b)) il comportamento di $\xi(1-b)$ per le due ampiezze è identico.

Si può vedere in figura 5.12 l'andamento del parametro ricavato da modello per tutti i casi (si ricorda che nello scenario di concentrazione in mare nulla $b = 0$ quindi $\xi(1-b) = \xi$).



(a) Marea entrante.



(b) Marea uscente.

Figura 5.11: Confronti multipli tra i parametri di interesse.

Si potrebbe quindi affermare che, anche se le condizioni iniziali (alta, bassa marea; diversa ampiezza) influenzano i parametri di mescolamento e ritorno, in realtà il fattore "complessivo", ovvero che tiene conto degli effetti di entrambi, $\xi(1-b)$, di fatto sembra non esserne influenzato, cioè presenta un comportamento indipendente dalla variazione dei singoli fattori.

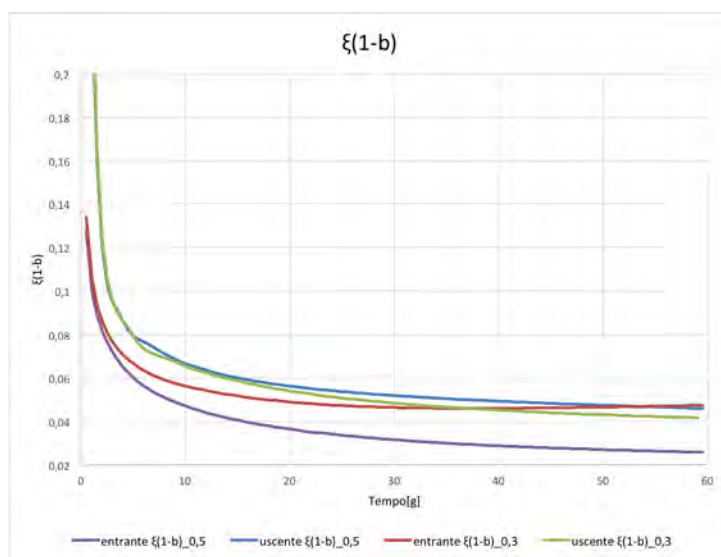


Figura 5.12: Andamento di $\xi(1-b)$ per ogni scenario.

5.4.4 Confronto tra b calcolati e valori di letteratura

Si vuole in questo capitolo confrontare i valori ottenuti del fattore di ritorno, già analizzati nel precedente 5.4.1, con alcune indicazioni fornite in letteratura.

Nello studio di *Sanford et al.* ([9]) il fattore b viene analizzato considerando diversi aspetti che lo influenzano: questi aspetti sono tre lunghezze scala e un tempo scala.

Le lunghezze scala sono l'iniziale larghezza della "bolla" di soluto che esce dall'apertura(/e) del bacino, B , la distanza da riva della linea che identifica il centro di questa "bolla", y_m , e una grandezza che caratterizza la diffusione, che dipende dalle caratteristiche idrodinamiche della corrente lungo la costa, σ_T . Dalle simulazioni effettuate è stato ottenuto il grafico riportato qui di seguito.

Nel grafico 5.13 ciò che si vede sono i valori che assume il fattore b al variare dei parametri adimensionali y_M/B e σ_T/B : se y_M/B è piccolo significa che la "bolla" (o "plume" come viene definita nello studio) di soluto fuoriuscita dal bacino rimane prossima all'apertura, e più aumenta questo rapporto più il "plume" si

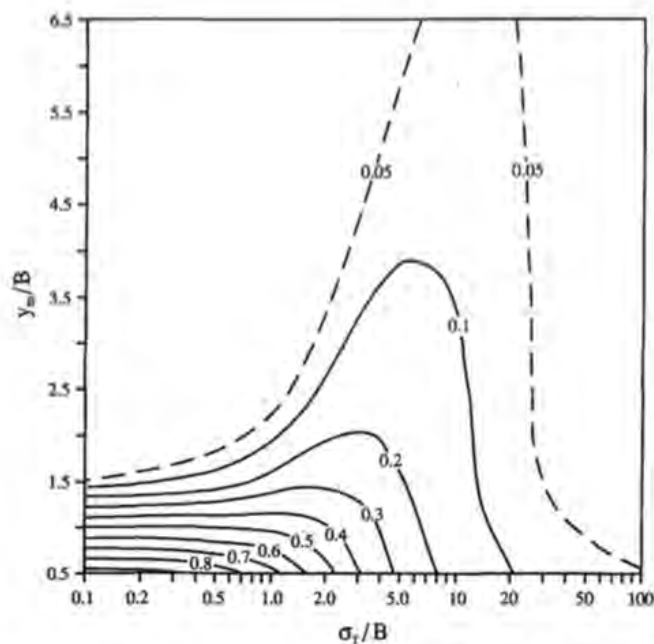


Figura 5.13: Andamento di $\xi(1 - b)$ per ogni scenario.

distanza dalla bocca; σ_T/B è legato alla diffusione laterale dovuta alla corrente “longshore”, e più l’intensità di questa aumenta più l’effetto di diffusione del tracciante lontano da riva è elevato.

Nel nostro caso di studio abbiamo che il tracciante uscito dal bacino si disperde nel mare aperto, e quindi siamo nel caso di elevati valori di y_M/B . Per questa situazione è stato elaborato un secondo grafico in cui l’andamento di b dipende di fatto solo dal fattore σ_T/B (figura 5.14).

Si vede in questo grafico che il fattore di ritorno decresce all’aumentare di σ_T/B , ovvero più la corrente lungo riva è influente più il “plume” si diffonde e meno porzione di soluto può rientrare all’interno del bacino.

Nel nostro caso di studio, ovvero Laguna di Venezia e porzione di Mar Adriatico settentrionale, le correnti “longshore” hanno intensità molto piccola e quindi i valori che ci interessano del rapporto σ_T/B sono quelli più piccoli.

Conseguenza di ciò è affermare che secondo questo studio il fattore di ritorno dovrebbe assumere valori alquanto elevati, intorno allo 0,9. Questo entra in piena contraddizione con i risultati ottenuti.

Analizzando i dati elaborati nei grafici 5.6 si vede chiaramente che il fattore di ritorno b parte da valori intorno allo 0,3 per poi salire rapidamente nei primi 20 giorni di simulazione: non è possibile quindi pensare di poter assumere lo 0,9 come

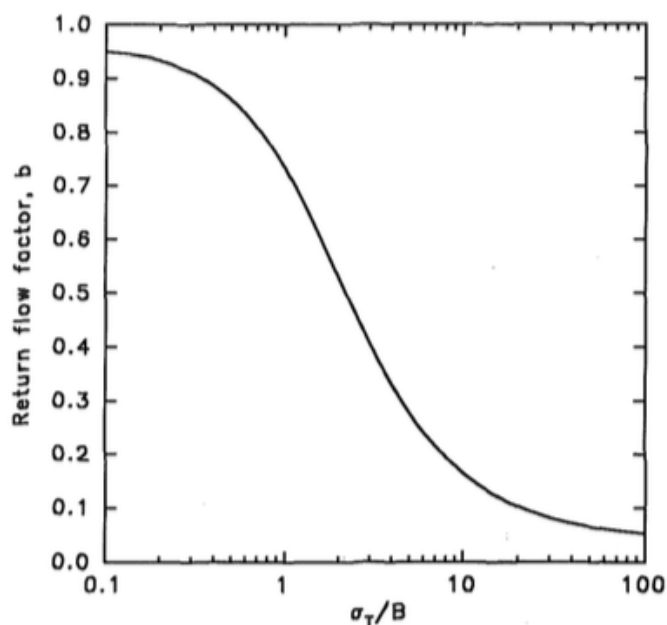


Figura 5.14: Andamento di $\xi(1 - b)$ per ogni scenario.

consigliato nello studio di *Sanford et al.* ([9]).

5.4.5 Modifica delle condizioni iniziali

Si è indagato come la variazione delle condizioni iniziali, in termine di tipologia di marea, possa influire nella determinazione del tempo di ricambio e del fattore di mescolamento.

Oltre agli scenari già indagati, ovvero quelli per condizione iniziale di alta marea o di bassa marea, sono stati studiati i casi in cui

- il livello iniziale in laguna è 0 *s.l.m.m.* e poi la marea crese
- il livello iniziale in laguna è 0 *s.l.m.m.* e poi la marea cala

I risultati ottenuti dal modello per il calcolo del tempo di ricambio globale (dalla conoscenza dell'andamento nel tempo delle portate di soluto) nel caso non si consideri il fattore di ritorno RT , o lo si consideri ET sono elencati nella seguente tabella e confrontati con quelli già ottenuti:

Ciò che si nota immediatamente è che, all'aumentare del livello iniziale in laguna, ovvero da bassa marea (o marea entrante) ad alta (o marea uscente), sia TR che ET aumentano; questo risultato è di semplice interpretazione: quando aumenta

	$TR[giorni]$			
	Entrante da 0	Entrante	Uscente da 0	Uscente
Marea 0,3m	16,6	17,7	13,13	12,4
Marea 0,5m	9,4	9,7	5,9	5,8

Tabella 5.2: Tempo di ricambio per marea di 0,3m e 0,5m nel caso di $b = 0$

	$ET[giorni]$			
	Entrante da 0	Entrante	Uscente da 0	Uscente
Marea 0,3m	20,4	21,5	17,1	16,2
Marea 0,5m	11,4	11,5	7,6	7,3

Tabella 5.3: Tempo di ricambio per marea di 0,3m e 0,5m nel caso di $b \neq 0$

il livello aumenta anche il volume d'acqua (e quindi di soluto) presente in laguna inizialmente, e ciò si traduce in maggiore tempo necessario a far decrescere la concentrazione fino alla soglia $1/e$ a parità di altre condizioni.

Sebbene le differenze tra le diverse condizioni iniziali (rimangono comunque distinte le fasi entrante/uscente) influenzino in maniera minore all'aumentare dell'ampiezza della marea, bisogna prestare comunque attenzioni alle condizioni iniziali nella fase di studio. Per ovviare a questo "problema" si potrebbe considerare invece del volume in laguna calcolato a $t = 0$ delle simulazioni, quello che si ha per 0 *s.l.m.m.*, valore che rimane costante.

Capitolo 6

Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stato analizzato il tempo scala chiamato “flushing time”, ovvero tempo di ricambio, e dopo averlo descritto da un punto di vista teorico, sia nella formulazione classica che in quella modificata qui proposta, è stato calcolato sotto diverse ipotesi con riferimento alla laguna di Venezia.

L’obiettivo principale dell’elaborato è stato quello di verificare quale tra il modello classico e quello modificato riuscisse a descrivere in maniera più completa i delicati meccanismi fisici che caratterizzano il ricambio idrico all’interno della Laguna.

Particolare attenzione è stata prestata nel valutare i parametri che descrivono il ritorno dell’acqua fuoriuscita nel bacino nel ciclo di marea successivo, (b), e gli effetti legati alla non uniforme distribuzione spaziale della concentrazione all’interno della laguna (ξ).

L’analisi è stata eseguita utilizzando un modello idrodinamico agli elementi finiti che simula i processi diffusivi, dai cui risultati si è potuta osservare l’entità del mescolamento tra le particelle nelle diverse zone lagunari. Un maggior mescolamento è indice di un migliore ricambio d’acqua e ciò comporta un più veloce decadimento della concentrazione all’interno della laguna.

Il tempo di ricambio è stato valutato sia a livello locale, ovvero spazialmente distribuito, sia a livello globale.

Si è notato che il tempo di ricambio locale si riduce in prossimità delle bocche, dove si ha maggior rinnovo dell’acqua, viceversa, lontano dalle bocche, dove il mescolamento con le acque provenienti dal mare è ridotto, questo assume valori molto più elevati.

Nello studio del tempo di ricambio globale, applicando i modelli descritti, si è arrivati alla descrizione dell’andamento temporale del fattore di ritorno b e del

fattore ξ legato al mescolamento: il loro comportamento risulta assai diverso per le diverse simulazioni effettuate con condizioni al contorno mutate, e ciò ha permesso di affermare che la loro stima o previsione è tutt'altro che semplice ed immediata. Il fattore $\xi(1 - b)$, che complessivamente tiene conto sia del fattore di ritorno che della non uniforme distribuzione della concentrazione nella laguna, è risultato avere un comportamento, al variare delle condizioni simulate, meno variabile rispetto ai due parametri valutati singolarmente. Su questo parametro quindi su di esso è stato possibile trarre qualche considerazione.

Concludendo, questo studio preliminare sui processi di mescolamento ci permette di affermare che, almeno per la laguna di Venezia, gli effetti legati ai flussi di ritorno e quelli legati alla non uniforme distribuzione della concentrazione non sono assolutamente trascurabili e devono essere tenuti in conto per avere stime realistiche dei tempi di ricambio.

Il comportamento di questo parametro, tuttavia, risulta assai complesso, e necessita di ulteriori studi approfonditi per poterne descrivere, e soprattutto prevedere, il comportamento (e gli effetti) in maniera più certa.

Bibliografia

- [1] Bolin, B., Rodhe, H., 1973, *A Note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs.*, Tellus 25, 58–62.
- [2] Caniato, G., Turri, E., Zanetti, E., 1995, *La laguna di Venezia*, Cierre edizioni, Verona.
- [3] Cucco, A., Umgiesser, G., 2006, *Modeling the Venice lagoon water residence time.*, Ecological Modeling 193, 34–51.
- [4] Cucco, A., Umgiesser, G., Ferrarin, C., Perilli, A., Canu, D.M., Solidoro, C., 2009, *Eulerian and lagrangian transport time scales of a tidal active coastal basin.*, Ecological Modelling 220, 913–922.
- [5] D’Alpaos, L., Defina, A., 1995, *Mathematical modeling of tidal flow over salt marshes dissected by an intricate network of channels*, Istituto Veneto di SS.LL.AA., Rapporti e Studi. XII, 353–372.
- [6] D’Alpaos, L., Defina, A., 2007, *Mathematical modeling of tidal hydrodynamics in shallow lagoons: A review of open issues and applications to the Venice lagoon.*, Computers & Geosciences 33, 476–496.
- [7] Defina, A., 2000, *Two dimensional shallow flow equations for partially dry areas.*, Water Resources Research 36(11), 3251–3264.
- [8] Marzolo, F., 1971, *Evoluzione della laguna di Venezia*, Tipografia Antoniana, Padova.
- [9] Sanford, L., Boicourt, W., Rives, S., 1992, *Model for estimating tidal flushing of small embayments.*, J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng., 118:635-654.
- [10] Takeoka, H., 1984, *Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea.*, Continental Shelf Research 3(3), 322– 326.

- [11] Viero, D.P., Defina, A.,2015, *Water age, local flushing time, residence and exposure time in meso-enclosed, tidal basins with negligible freshwater inflow.*, Preprint submitted to Estuarine, coastal and shelf science.
- [12] Zimmerman, J.T.F., 1976, *Mixing and flushing of tidal embayments in the western Dutch Wadden Sea e part I: distribution of salinity and calculation of mixing time scales.*, Netherlands Journal of Sea Research 10, 149-191.