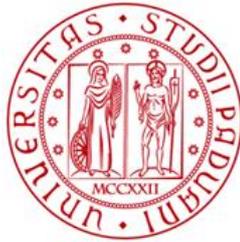


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale



Tesi di laurea magistrale in Ingegneria Civile

ANALISI DI ALCUNI INDICATORI IDRODINAMICI
DELLA QUALITÀ DELLE ACQUE NELLA LAGUNA
DI VENEZIA

Relatore

Andrea Defina

Studentessa

Giulia Busnardo

Anno Accademico 2012/2013

Indice

<i>1 INTRODUZIONE</i>	3
<i>2 L'ETÀ DELL'ACQUA E IL TEMPO DI RESIDENZA</i>	7
2.1 CONSIDERAZIONI PRELIMINARI SU "WATER AGE" E "RESIDENCE TIME"	7
2.2 "WATER AGE" E "RESIDENCE TIME" IN LETTERATURA	10
2.3 L'ETÀ DELL'ACQUA	12
2.4 IL TEMPO DI RESIDENZA	14
2.5 RELAZIONE TRA L'ETÀ DELL'ACQUA E L' "E-FOLDING RESIDENCE TIME"	15
<i>3 INQUADRAMENTO MORFOLOGICO E AMBIENTALE DELLA LAGUNA DI VENEZIA</i>	17
3.1 NASCITA ED EVOLUZIONE DI UNA LAGUNA	17
3.2 LA LAGUNA DI VENEZIA	18
3.2.1 Evoluzione storica della laguna di Venezia	19
3.2.2 Morfologia lagunare	20
3.2.3 Ambiente lagunare	22
3.3 FENOMENI MORFOLOGICI E INTERVENTI ANTROPICI	24
3.4 INQUINAMENTO AMBIENTALE ED EUTROFIZZAZIONE	27

4	<i>GLI STRUMENTI DI CALCOLO</i>	31
4.1	INTRODUZIONE	31
4.2	IL DOMINIO DI CALCOLO (.geo)	34
4.3	ISTRUZIONI E CONDIZIONI AL CONTORNO (.sim)	41
4.4	RISULTATI DELLA SIMULAZIONE (.out)	44
5	<i>APPLICAZIONE ALLA LAGUNA DI VENEZIA</i>	45
5.1	MODELLI IMPIEGATI	45
5.2	VALUTAZIONE DELL'ETÀ DELL'ACQUA	46
5.2.1	L'età dell'acqua con diffusione	53
5.3	VALUTAZIONE DEL TEMPO DI RESIDENZA	57
5.4	CONFRONTO TRA GLI INDICATORI	62
5.4.1	Età dell'acqua calcolata con e senza diffusione	62
5.4.2	Età dell'acqua calcolata senza diffusione e tempo di residenza	63
5.4.3	Età dell'acqua calcolata con la diffusione e tempo di residenza	64
6	<i>CONCLUSIONI</i>	67
	<i>APPENDICE 1: terminologia dei tempi-scala</i>	69
	<i>APPENDICE 2: e-folding residence time</i>	73
	<i>Bibliografia</i>	77

Capitolo 1

INTRODUZIONE

Il crescente interesse per gli ambienti marini e in particolare per le aree costiere nasce dall'importanza che tali aree hanno per la vita dell'uomo e dalla considerazione che sono soggette a molteplici impatti antropici, che interagiscono con le grandi eterogeneità e variabilità proprie degli ambienti costieri. 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 implementazione di politiche di conservazione biologica, di gestione e recupero ambientale è dunque 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 che soffrono però di alcune limitazioni. Nei bacini naturali è necessario studiare come evolvono molte specie chimiche e biologiche, incluse le interazioni, spesso complesse, tra le diverse specie. Essendo però le equazioni evolutive spesso rappresentate da cinetiche del primo ordine, che concettualizzano la realtà, si richiede una calibrazione dei parametri del modello. Generalmente ci sono pochi rilievi sperimentali che consentano una ragionevole calibrazione, pertanto ci si affida all'esperienza e all'intuizione, che non sempre garantisce un risultato affidabile, proprio a causa della molteplicità delle interazioni tra le diverse specie chimiche e biologiche. Per questi motivi, non è agevole proporre delle soluzioni progettuali in quanto è difficile capire le cause di determinate problematiche e gli effetti che tali interventi comporterebbero, data la complessità del modello.

Per ovviare alle criticità di questi modelli, o meglio, per poter più precisamente formulare dei giudizi sulla qualità delle acque e proporre degli interventi di miglioramento, è più 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-rinnovarsi sono alcuni tempi-scala caratteristici.

Perché un tempo-scala è un indice della qualità delle acque? Come viene impiegato nelle applicazioni pratiche? Si consideri ad esempio il tempo-scala detto "flushing time". Lo studio di questo tempo caratteristico è importante nelle analisi di sostanze inquinanti in ambienti marini ed è definito come il tempo richiesto per rimpiazzare l'acqua inquinata accumulata in un bacino con acqua pulita. 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 "flushing time", 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 deossigenazione dell'acqua in un bacino costiero dipende soprattutto dall'entità del mescolamento d'acqua con il mare. Di conseguenza, il rischio di eutrofizzazione provocato dalla deossigenazione dell'acqua si riduce se gli organismi planctonici sono rapidamente rimossi dal bacino, cioè se c'è un buon ricambio d'acqua. Accanto al concetto di "flushing time", che indica dunque il tempo richiesto perché l'acqua di un bacino venga rimpiazzata completamente con altra acqua proveniente dal mare, si può considerare il

concetto di “residence time”. Questo è il tempo medio di permanenza di una particella d’acqua all’interno di un bacino, che è molto simile al “turn-over time”, un altro tempo-scala definito come il tempo richiesto per rimuovere il 63% dell’acqua presente in un bacino. Se il “residence time” di un bacino è breve sarà tanto più favorito il ricambio d’acqua. Il vantaggio è duplice perché le sostanze inorganiche sono espulse velocemente e sono inoltre rimossi gli organismi planctonici morti per la mancanza di approvvigionamento. Nei sistemi costieri dove il “residence time” è più lungo, invece, le sostanze inorganiche contribuiscono alla crescita non solo delle abbondanze planctoniche di una generazione, ma, quando queste muoiono, sono a sua volta fonte di approvvigionamento delle future generazioni. I fattori che influenzano il “residence time” sono la marea, la quantità d’acqua entrante, la profondità dei fondali e il volume del bacino.

Tra i diversi tempi-scala impiegati c’è confusione in letteratura: nomenclature diverse vengono date allo stesso tempo-scala, come pure lo stesso nome viene definito in modo diverso. Nell’APPENDICE 1 si illustrano alcuni tempi-scala utilizzati nella pratica, tra cui il “residence time”, il “flushing time”, il “turn-over time”, il “transit time”, con le diverse definizioni loro attribuite.

Tra i diversi indicatori, nel presente lavoro si analizzano in particolare l’*età dell’acqua* e il *tempo di residenza*. L’età di una particella è definita come il tempo che trascorre da quando è entrata in un bacino, mentre il tempo di residenza è il tempo che una particella all’interno di un bacino impiega a raggiungere l’uscita.

In qualche caso i “tempi caratteristici” possono avere lo stesso valore ma è importante comunque distinguerli dal punto di vista concettuale, altrimenti si rischia di fraintendere quello che accade fisicamente. Per esempio, l’età dell’acqua e il tempo di residenza sono quantitativamente la stessa cosa in un bacino a marea, ma sono concettualmente diversi. È infatti questo l’oggetto principale del presente lavoro, quello di dimostrare l’equivalenza tra i due indicatori, prima da un punto di vista teorico, poi da uno pratico, in uno studio applicato nella laguna di Venezia.

Il lavoro si suddivide in diversi capitoli. In particolare, nel capitolo 2 si intende trattare i due indicatori idrodinamici da un punto di vista teorico e descrivere quali equazioni ne governano l’andamento nel tempo. Visto che la loro applicazione 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 dei tempi-scala e nel capitolo 5 si mostrano i risultati ottenuti, evidenziando come variano nelle diverse zone della laguna di Venezia. Infine, nel capitolo 6 si traggono le conclusioni.

Capitolo 2

L'ETÀ DELL'ACQUA E IL TEMPO DI RESIDENZA

In questo capitolo si vuole descrivere in modo più approfondito e analitico l'età dell'acqua o "water age" e il tempo di residenza o "residence time", al fine di comprendere la relazione che lega questi due indicatori idrodinamici.

2.1 CONSIDERAZIONI PRELIMINARI SU "WATER AGE" E "RESIDENCE TIME"

La definizione dei tempi-scala caratteristici è apparentemente semplice ma può complicarsi non poco non appena varino le condizioni al contorno o il tipo di moto. Si vuole mostrare, con queste prime considerazioni, che il problema di definire univocamente i tempi-scala d'interesse è tutt'altro che banale.

Si considera ora il caso più semplice di un moto puramente convettivo, assumendo cioè trascurabili i processi diffusivi, in un dominio avente una sezione in ingresso o sorgente e una sezione in uscita o pozzo, come rappresentato in figura 2.1.

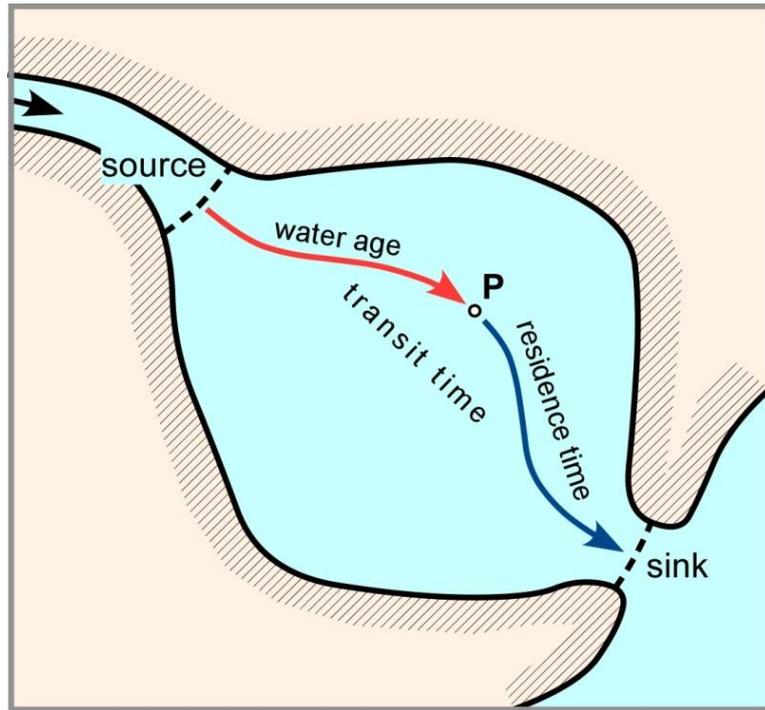


Figura 2.1: L'età dell'acqua, il tempo di residenza e il tempo di transito

Con riferimento alla figura, l'età dell'acqua è il tempo necessario che impiega una particella a spostarsi dalla sezione in entrata al punto P, il tempo di residenza è invece il tempo che ci impiega ad andare dal punto P alla sezione in uscita e il tempo di transito è la somma di questi tempi. In questo esempio “water age” e “residence time” sono 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. In particolare, si può notare che il tempo di transito coincide con il tempo di residenza quando il punto P è posto in corrispondenza della sezione in entrata oppure coincide con l'età se il punto P coincide con la sezione in uscita.

La definizione di “transit time” può sembrare inutile ma in realtà è comoda. Ad esempio, se si considera come “source” un punto qualsiasi del dominio e non una particolare sezione in ingresso, il tempo di residenza è il tempo che la particella d'acqua iniettata spende per coprire la distanza dalla “source”, così immaginata, alla sezione in uscita o, in altre parole, il “transit time” per ogni punto P nel dominio. È quindi opportuno che non venga considerato “source” un punto all'interno del dominio, ma, per evitare confusioni, è bene che “source” e “sink” appartengano al bordo del 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.

Analoghi problemi di definizione valgono per il tempo di transito.

Si consideri ora un moto dominato dalla diffusione e che il trasporto convettivo sia trascurabilmente piccolo. Se si inietta istantaneamente una massa di tracciante in P si vedrà uscire una nuvola di tracciante attraverso la sezione in uscita, ma in questo caso, per effetto della diffusione, il tracciante potrà uscire anche attraverso la sezione in ingresso (che diventa dunque una sezione in uscita). In questo caso particolare, a maggior ragione, non ha senso parlare di "baricentro" della macchia ed ha senso invece l'altra definizione di "residence time", capire cioè quando il tracciante sia uscito dal dominio. Lo stesso ragionamento vale per il punto P, che sarà raggiunto, per diffusione, dall'acqua che entra attraverso la sorgente ma anche attraverso il pozzo (che diventa a sua volta una sorgente).

Queste considerazioni riguardo alla diffusione, in cui "source" e "sink" si confondono, sono le stesse che si fanno per un bacino a marea, come lo è la laguna di Venezia. 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.

Dalle considerazioni fatte si può quindi dedurre che nel definire i tempi-scala, ciò che conta non è tanto il rigore da un punto di vista matematico, ma è più quello di intuire ciò che accade da un punto di vista fisico, tenendo presente la “significatività” del tempo-scala scelto e prestando attenzione al tipo di trasporto (convettivo o diffusivo), al tipo di moto (stazionario, periodico, vario) per capire ciò che avviene nel dominio di studio. Bisogna infine tener presente che cosa vuol dire, in termini di qualità delle acque, un tempo lungo o corto, se i risultati trovati sono significativi o meno per lo studio che si deve compiere.

2.2 “WATER AGE” E “RESIDENCE TIME” IN LETTERATURA

La definizione degli indicatori idrodinamici non è complicata solo da un punto di vista fisico, come si è appena illustrato, ma è anche oggetto di grande confusione in letteratura. Ciò si evince dalle indicazioni contrastanti che si trovano nei diversi articoli, da alcune assunzioni poco giustificate o dall’uso errato di termini simili ma non uguali.

Si vuole considerare ora, a titolo di esempio, un recente articolo [Cucco e Umgiesser, 2006] riguardante il tempo di residenza nella laguna di Venezia, per cercare di commentarlo in modo critico, prestando attenzione agli elementi di contrasto.

In questo articolo viene calcolato il tempo di residenza nella laguna di Venezia mediante un modello idrodinamico. L’analisi riguarda come varia tale parametro al variare delle forzanti di marea e di vento.

Si trova la prima incongruenza quando vengono enunciate le equazioni utilizzate dal modello e viene introdotto un coefficiente di diffusività, imposto pari a $3,7 \text{ m}^2/\text{s}$, senza giustificarlo. Tale coefficiente è supposto piccolo in quanto, per intense forzanti, il moto di una particella d’acqua è dominato da processi avvevativi invece che diffusivi o dispersivi, ma non è chiaro in base a cosa questo parametro sia effettivamente piccolo. La parametrizzazione viene giustificata anche dalla raffinatezza della mesh di calcolo ma anche questa giustificazione risulta poco chiara per giustificare il valore scelto per il coefficiente di diffusività.

In questo articolo è menzionata la non chiarezza riguardo al termine “residence time”, per i diversi significati ad esso associati. Molti autori lo definiscono come il tempo richiesto a una particella d’acqua per andare da una posizione definita all’interno di una regione fino al confine [Bolin and Rodhe, 1973; Zimmerman, 1976; Dronkers and Zimmerman, 1982; de Kreeke, 1983; Prandle, 1984]. Altri autori invece lo definiscono come il tempo medio che tutta l’acqua presente nel dominio iniziale rimanga all’interno di esso [Wang et al., 2004]. Per i primi dunque il tempo di residenza è un concetto locale, dipendente dalla posizione delle particelle, per gli altri invece è un concetto esteso, mediato nell’intero bacino.

Per gli autori dell'articolo il tempo di residenza è definito come il tempo richiesto per ciascun elemento presente nel dominio di rimpiazzare con acqua pulita la maggior parte della massa di tracciante conservativo rilasciata inizialmente. Per valutarlo numericamente viene utilizzata la relazione matematica data da Takeoka (1984), nota come “remnant function”.

Si consideri un tracciante, inizialmente rilasciato in un bacino con una concentrazione del 100%, soggetto all'azione della marea e del vento. Se il bacino è in collegamento con il mare, che invece ha inizialmente una concentrazione di tracciante pari a 0%, nel tempo si osserva un decadimento della concentrazione nel bacino, dato dal mescolamento tra l'acqua all'interno dello stesso e quella pulita del mare. La “remnant function” $r(x,y,t)$ della concentrazione, funzione dello spazio e del tempo, è data da:

$$r(x, y, t) = \frac{C(x, y, t)}{C_0(x, y, t)}$$

dove C è la concentrazione di tracciante all'istante t nella posizione (x,y) e C_0 è la concentrazione nello stesso punto all'istante $t = 0$ s.

Il tempo di residenza τ è definito da:

$$\tau = \int_0^{\infty} r(t) dt$$

e per ogni punto del dominio da:

$$\tau(x, y) = \int_0^{\infty} r(x, y, t) dt$$

Se il decadimento della concentrazione C è esponenziale, del tipo:

$$C(t) = C_0 e^{-\alpha t}$$

e sostituendolo nell'espressione del tempo di residenza si ottiene:

$$\tau = \int_0^{\infty} \frac{C_0 e^{-\alpha t}}{C_0} dt = \frac{1}{\alpha}$$

Il valore calcolato è dunque il tempo necessario perché la concentrazione si abbassi al valore $1/e$ di quello iniziale ed è definito “e-folding residence time”.

Si evince inoltre un'incongruenza sulla definizione, che descrive un tempo di ricambio/rinnovo, non un tempo di residenza, che è concettualmente diverso. Marcare tutta l'acqua presente in un bacino con un tracciante a concentrazione C_0 significa imporre la condizione iniziale nel bacino, nell'istante $t = 0$ s. Preso poi un generico punto, quanto tempo si deve aspettare perché in tale punto sia presente solo la quantità $1/e$ dell'acqua “vecchia” e che la restante $(1-1/e)$ sia acqua proveniente dal mare a partire da $t > 0$? La risposta a questa domanda esprime in quanto tempo l'acqua di questo punto, o meglio una parte dell'acqua in questo punto, è

acqua “nuova” e quindi la media su tutto il bacino di questo tempo corrisponde all’ “e-folding residence time” sopra definito. Gli autori del presente articolo intendono il tempo di residenza come un tempo di rinnovo dell’acqua in ciascuna posizione nel bacino, ma è proprio questo il limite. Il tempo di residenza non deve far riferimento al decadimento della concentrazione di un punto, ma deve considerare il decadimento della concentrazione nell’intero bacino. Ovviamente il tempo perché nell’intero bacino la concentrazione si riduca di $1/e$ rispetto a quella iniziale varia da punto a punto, per questo probabilmente c’è confusione. Se si inietta una massa in un bacino, si vuole capire quanto tempo tale massa resti nel bacino, non quanto resti nel punto in cui è stata iniettata inizialmente. Se ad esempio un’imbarcazione rilascia una massa d’inquinante in una certa zona è interessante sapere quanto tempo questa massa resti nel bacino o in una particolare area del bacino. Il tempo di residenza di Cucco e Umgiesser invece implica che localmente la concentrazione di un qualsiasi tracciante può ridursi in un tempo T , non viene considerato che l’inquinante immesso in quel punto può migrare, finire in una “dead zone” e rimanere nei pressi anche per tempi molto maggiori di T .

In qualche caso i “tempi caratteristici” possono avere lo stesso valore ma è importante comunque distinguerli dal punto di vista concettuale, altrimenti si rischia di fraintendere quello che accade fisicamente.

2.3 L’ETÀ DELL’ACQUA

La definizione di età dell’acqua o “water age” è semplice e non controversa. È definita come il tempo che una particella d’acqua trascorre in un dominio d’interesse, dal momento in cui lascia la sezione d’ingresso, dove l’età è assunta nulla, al momento in cui raggiunge un punto definito all’interno del dominio d’interesse [Bolin and Rodhe, 1973; Zimmerman, 1976; Takeoka, 1984].

Accanto alla definizione di “water age” si deve precisare il concetto di particella d’acqua o “water parcel”. Questa consiste in un piccolo volume, preso in un intorno di un generico punto del dominio, avente “caratteristiche” pari alla media delle caratteristiche delle particelle che occupano, istante per istante, questo volume. Grazie a questa definizione si comprende per quale motivo l’acqua possa ringiovanire. L’età dell’acqua infatti può ridursi quando entrano nel “water parcel” particelle di età inferiore rispetto a quelle presenti un istante prima, così che l’età media si abbassi.

L’età dell’acqua così definita è dunque un concetto locale, poiché riferito al “water parcel” e non all’intero dominio di studio. Se si facesse la media dell’età delle particelle che occupano in ogni istante l’intero dominio d’interesse, allora si farebbe riferimento ad un concetto esteso, anche se poco significativo nelle applicazioni pratiche.

L'equazione che governa l'andamento nel tempo e nello spazio dell'età dell'acqua [Thiele and Sarmiento, 1990; England, 1995] è:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = 1 - \nabla \cdot (\mathbf{u}a - \mathbf{D} \cdot \nabla a) \quad (1)$$

dove $a(\mathbf{x}, t)$ è il valore locale ed istantaneo dell'età dell'acqua, \mathbf{u} la velocità dell'acqua e \mathbf{D} il tensore della diffusione.

Il primo termine a destra dell'uguaglianza, detto "velocità di invecchiamento", esprime come varia nel tempo l'età dell'acqua in un generico punto del dominio in assenza di trasporto per convezione e diffusione, cioè in acqua stagnante. Infatti supponendo di trascurare gli altri termini si avrebbe:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = 1$$

da cui risolvendo si ha:

$$a = t + cost$$

ed, essendo che per $t = 0$ s l'età $a = 0$ quindi $cost = 0$, vale la relazione:

$$a = t$$

Gli altri termini a destra dell'uguaglianza governano la convezione ($\nabla \mathbf{u} a$), cioè come una nuvola di particelle d'acqua si sposta nel dominio, e la diffusione ($\nabla \mathbf{D} \cdot \nabla a$), cioè come le particelle d'acqua si spostano in tale nuvola. L'equazione si può quindi applicare indifferentemente in problemi dominati da convezione o da diffusione.

Nel caso di moto stazionario o periodico, come si assume nella presente trattazione, la soluzione dell'equazione (1) converge, per t tendente ad infinito, verso un valore indipendente dalle condizioni iniziali. Indicando con $A(\mathbf{x})$ questo valore, si può definire propriamente come "water age".

Si può notare quindi che l'equazione dell'età dell'acqua presenta un'analogia, a meno del termine che descrive la "velocità di invecchiamento", con la classica equazione del trasporto e diffusione:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \mathbf{u} C - \nabla \mathbf{D} \cdot \nabla C = 0 \quad (2)$$

dove C è la concentrazione, $(\nabla \mathbf{u} C)$ è il termine convettivo e $(\nabla \mathbf{D} \cdot \nabla C)$ è il termine diffusivo.

2.4 IL TEMPO DI RESIDENZA

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. [Bolin and Rodhe, 1973; Zimmerman, 1976; Takeoka, 1984]. In presenza di diffusione, come si è detto, questo tempo risulterebbe infinito e per questo motivo, 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. Spesso questa percentuale è assunta pari a $1/e$, e la ragione di questa scelta si basa sull'ipotesi che il decadimento della massa di tracciante presente nel bacino segua una legge di tipo esponenziale. In questo caso il tempo di residenza è chiamato "e-folding residence time", che, espresso in italiano, esige di ben più di tre parole: si potrebbe definire "tempo di residenza fino alla soglia $1/e$ della concentrazione" e si riporta in APPENDICE 2 come e con quali approssimazioni si arrivi alla sua espressione. Per valutare la distribuzione spaziale di questo tempo di residenza in un generico bacino è necessario effettuare numerose simulazioni. Ogni simulazione prevede di immettere una massa di tracciante M_0 in un generico punto del bacino a cui corrisponde una concentrazione media di tracciante nel bacino pari a:

$$C_{m0} = \frac{M_0}{V}$$

in cui V è il volume d'acqua nel bacino e il pedice "m" indica che si tratta di una concentrazione media su tutto il bacino. La stessa simulazione prevede di valutare il tempo necessario affinché la concentrazione media nel bacino scenda al valore $1/e$. In altre parole, detto T_e l' "e-folding residence time" associato al generico punto di immissione, deve essere verificata l'uguaglianza:

$$\frac{C_m(T_e)}{C_{m0}} = \frac{1}{e}$$

Questo modo di procedere, dal punto di vista computazionale, risulta però molto pesante poiché sono necessarie numerose simulazioni, in ognuna delle quali viene variata la posizione del punto di immissione del tracciante, per poter ricostruire una accurata distribuzione spaziale dei tempi di residenza.

Come detto in precedenza, in alcuni lavori recenti [Cucco e Umgiesser, 2006] è stata proposta un'estensione della tecnica appena illustrata per il calcolo del tempo di residenza, che consiste nel distribuire una concentrazione iniziale C_0 in tutto il bacino e valutare, in ogni punto, il tempo impiegato dalla concentrazione a ridursi al valore:

$$C = \frac{C_0}{e}$$

secondo un decadimento esponenziale del tipo:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-t/T_e} \quad (3)$$

Questo tempo è ancora chiamato “e-folding residence time”. In questo modo è sufficiente una sola simulazione per determinare la distribuzione spaziale di questo tempo-scala. Va però precisato che non è dimostrato che, operando in questo modo, si ottenga il vero “e-folding residence time”.

La (3) è la soluzione dell’equazione:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{C}{T_e} \quad (4)$$

Nel paragrafo seguente si mostra come quest’ultima definizione di “e-folding residence time” corrisponda sostanzialmente all’età dell’acqua. Il tempo di residenza, a differenza della definizione di età dell’acqua, è un concetto più complesso a livello teorico tuttavia l’applicazione pratica di questo indicatore, sulla base di ipotesi semplificative, risulta molto più snella e veloce.

2.5 RELAZIONE TRA L’ETÀ DELL’ACQUA E L’ “E-FOLDING RESIDENCE TIME”

Come si è visto nel paragrafo 2.4, in un bacino dominato dalla diffusione, con qualche approssimazione si può assumere che la concentrazione di una qualsiasi sostanza conservativa, immessa in un certo istante puntualmente o in modo diffuso, si riduca esponenzialmente secondo la legge espressa dalla (3). È dunque con questa legge che, in prima approssimazione, l’età in assenza d’invecchiamento tende a ridursi.

Confrontando le equazioni (2) e (4) si ha che:

$$-\frac{C}{T_e} = -\nabla \mathbf{u} C + \nabla \mathbf{D} \cdot \nabla C$$

e, per l’analogia tra l’età a e la concentrazione C , si può riscrivere la (1) come:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = 1 - \frac{a}{T_e}$$

Essendo l’età funzione del tempo, si possono separare le variabili e integrare:

$$\frac{da}{T_e - a} = \frac{dt}{T_e}$$

$$\ln(T_e - a) = -\frac{t}{T_e} + const$$

$$\ln(T_e - a_0) = const$$

$$\ln\left(\frac{T_e - a}{T_e - a_0}\right) = -\frac{t}{T_e}$$

$$\frac{T_e - a}{T_e - a_0} = e^{-t/T_e}$$

ottenendo la seguente espressione per l'età a :

$$a = T_e + (a_0 - T_e)e^{-t/T_e}$$

in cui a_0 è l'età iniziale.

Per un tempo infinito in cui $a = A$, come si è definito nel paragrafo 2.3, si ricava dunque l'uguaglianza:

$$A = T_e$$

Aver dimostrato che l'età dell'acqua è pari all' "e-folding residence time" è l'obiettivo fondamentale del presente lavoro.

Questo risultato permette quindi di snellire nelle applicazioni pratiche l'analisi dei tempi-scala, potendo calcolare numericamente il tempo di residenza perché più veloce, ma tenendo presente che è equivalente all'età. Mentre l'età dell'acqua è definita solo per un tempo che tende ad infinito, il tempo di residenza, una volta raggiunta la soglia $1/e$ nel bacino, è subito determinato, senza la necessità di estrapolare il suo andamento nel tempo, come invece succede per la stima dell'età.

Nel capitolo 5, in uno studio applicato alla laguna di Venezia, si vuole dimostrare la valenza di questa uguaglianza.

Capitolo 3

INQUADRAMENTO MORFOLOGICO E AMBIENTALE DELLA LAGUNA DI VENEZIA

In questo capitolo si vuole illustrare la laguna di Venezia, oggetto della trattazione, nelle sue peculiarità, focalizzando l'attenzione non solamente al suo stato attuale, ma anche agli avvenimenti passati e ai possibili sviluppi futuri.

In un primo momento si descrive una laguna come forma costiera di una pianura alluvionale, al fine di comprendere come nasce e il suo possibile destino. In seguito si delinea l'evoluzione, la particolare morfologia del territorio e l'ambiente caratteristico, propri della laguna veneziana. Si forniscono poi alcune nozioni per quanto riguarda i fenomeni naturali e gli interventi antropici più importanti, che hanno mostrato evidenti conseguenze in laguna. Infine si tratta l'inquinamento ambientale per capire come questo possa influenzare la laguna.

3.1 NASCITA ED EVOLUZIONE DI UNA LAGUNA

Una laguna è la forma costiera di una pianura alluvionale, che nasce dall'opposizione tra i processi continentali e quelli marini. Gli elementi continentali sono individuati dai fiumi, che trasportano sedimenti di granulometria man mano più fine avvicinandosi al bacino marino, passando dalle ghiaie alle sabbie, ai limi e alle argille. Gli elementi marini sono individuati dal moto ondoso, dalle maree e dalle correnti litoranee, generate nell'alto Adriatico dai venti di bora e di scirocco. L'interazione di questi elementi predispone alla formazione di ambienti lagunari.

Il materiale solido trasportato dai fiumi proviene dai rilievi montuosi di recente formazione, quali sono le Alpi, soggette quindi a forte erosione. Raggiunto il mare, a livello della foce dei fiumi i sedimenti danno luogo a formazioni protese dette *delta*, mentre a livello del mare vengono trasportati dalle correnti costiere, depositandosi poi per effetto della gravità in formazioni allungate dette *barre*. Un tratto di costa compresa tra formazioni deltizie tende così a trasformarsi in un bacino parzialmente isolato dal mare, cioè in una *laguna*, grazie alla posizione delle barre costiere, le quali delimitano la futura laguna dal mare. Inoltre, per azione del moto ondoso del mare che continua a depositare sabbie, le barre costiere si trasformano in *lidi*, i quali sono intervallati da varchi, detti *bocche di porto*, responsabili del ricambio d'acqua tra mare e laguna.

Le correnti di flusso e riflusso che si producono tra mare e laguna, quando il mare è soggetto a oscillazioni di marea sufficientemente elevate, mantengono efficienti le bocche di porto, che consentono il trasporto in mare anche di parte dei sedimenti provenienti dai fiumi interni, ripulendo in questo modo la laguna.

La tendenza evolutiva di una laguna dipende, come la sua nascita, dalla combinazione tra le forze erosive marine e l'apporto di sedimenti. Possono dunque presentarsi diverse situazioni:

- se prevalgono i materiali solidi, che causano l'ostruzione delle bocche di porto e l'accumulo di sedimenti all'interno del bacino lagunare, una laguna tende all'interrimento e a trasformarsi in un nuovo lembo di terra emersa,
- se prevalgono le forze erosive del moto ondoso e delle maree, che provocano la scomparsa delle formazioni emerse, una laguna si trasforma in un braccio di mare,
- se erosione e sedimentazione si compensano, cioè esiste un corretto bilancio ripascimento-erosione, l'ambiente lagunare sopravvive.

3.2 LA LAGUNA DI VENEZIA

Visto come nasce una laguna e il suo carattere in costante evoluzione, dovuto allo scontro tra forze marine e continentali, si vuole ora dare una descrizione più approfondita in riferimento alla laguna di Venezia (figura 3.1). Partendo da nozioni storiche riguardo alla sua nascita, si vuole poi delineare lo stato attuale della laguna da un punto di vista della morfologia, dell'ambiente e degli elementi tipici che la caratterizzano.



Figura 3.1: Foto aerea della laguna di Venezia

3.2.1 Evoluzione storica della laguna di Venezia

La laguna di Venezia è nata sei mila 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, 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. Il trasporto solido, dovuto ai fiumi Tagliamento e Piave a nord, Adige e Po a sud, ripasceva i lidi e talora occludeva le bocche. Allo scopo di evitare l'interrimento della laguna, dal 1300 si intrapresero opere di diversione dei fiumi, che si sono completate in epoca moderna. L'opera della Serenissima tuttavia, risolto il problema dell'interrimento da un lato, lasciava poco contrastata l'erosione marina dall'altro. Infatti è questa la tendenza evolutiva attuale: un processo parallelo di erosione e

di abbassamento del suolo sta trasformando la laguna da ambiente deltizio in un sistema sempre più simile a quello marino.

In figura 3.2 si riporta uno schema delle fasi di formazione (a. e b.), dell'epoca medievale (c.) fino allo stato attuale (d.).

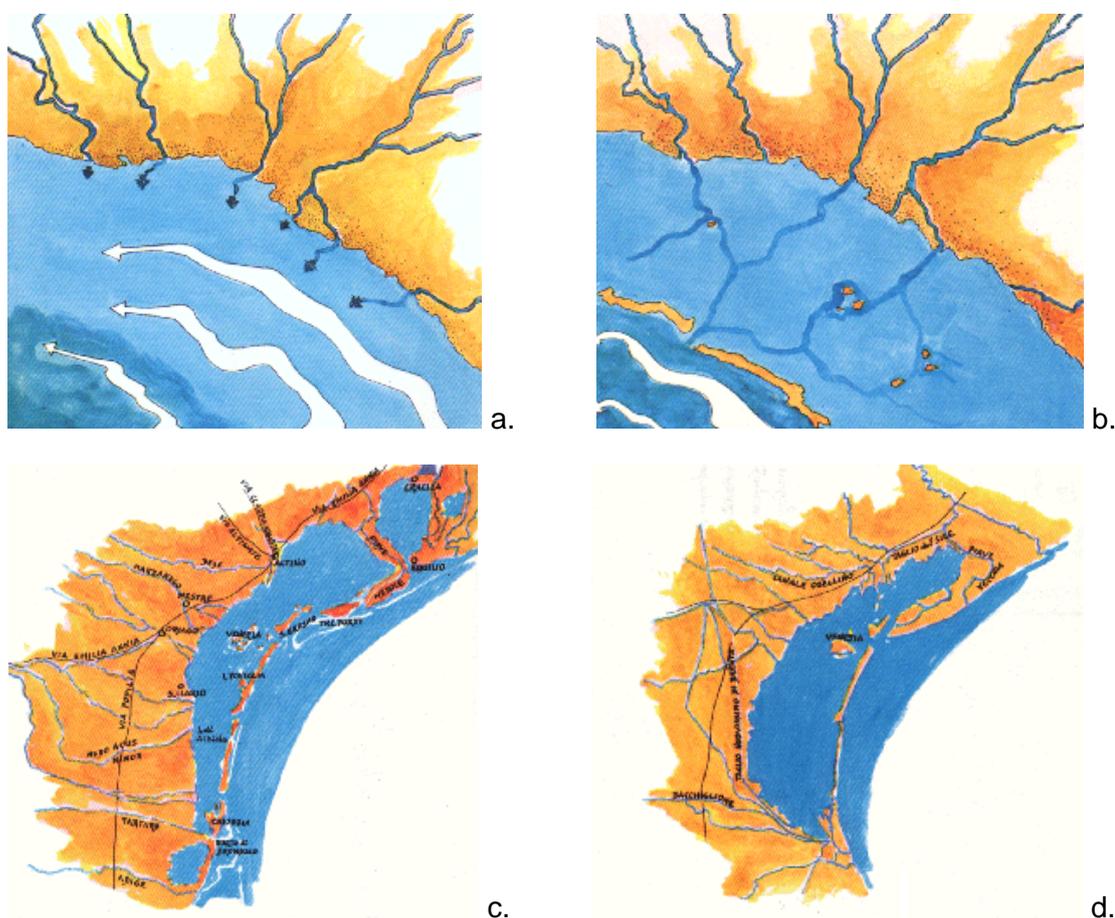


Figura 3.2: Schema delle fasi di formazione della laguna di Venezia

3.2.2 Morfologia lagunare

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.

In figura 3.3 è rappresentata la laguna di Venezia, dove si distinguono le diverse componenti morfologiche.

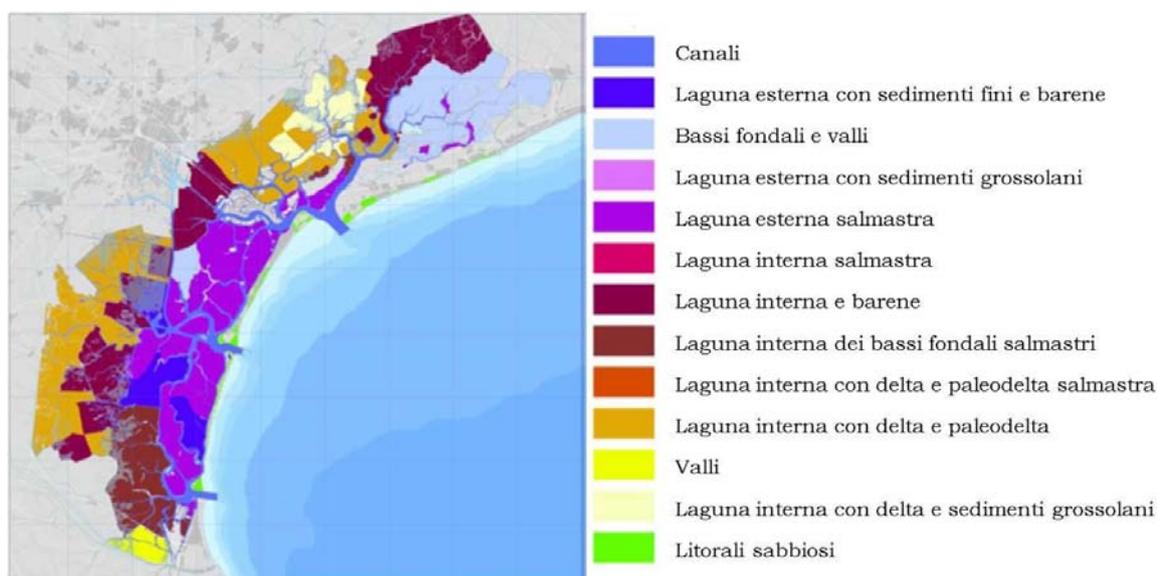


Figura 3.3: Componenti morfologiche della laguna di Venezia

Le acque del mare penetrano in laguna attraverso tre bocche di porto, denominate rispettivamente da quella più a nord a quella più a sud:

1. porto di Lido,
2. porto di Malamocco,
3. 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.

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. Nelle zone interne più distanti dal mare, l'oscillazione di marea arriva notevolmente attenuata, con un ritardo che va dalle due alle tre ore, per effetto dell'attrito sviluppato dai bassi fondali e dall'andamento sinuoso dei canali più interni contornati dalle barene.

3.2.3 Ambiente lagunare

Nella laguna di Venezia si distinguono zone aventi caratteristiche morfologiche e ambientali diverse tra loro, tra cui le barene, le velme e i bassifondi, i canali a marea, i lidi o “cordoni litoranei”, le valli da pesca e le casse di colmata.

Le barene (figura 3.4) svolgono la funzione fondamentale di regolare l'idrodinamica lagunare senza opporsi all'espansione delle maree e ospitano una ricca vegetazione che aiuta la deposizione del sedimento. La vegetazione presente nelle barene è detta *alofila* in quanto è costituita da piante capaci di svolgere l'intero ciclo vitale in ambienti inospitali, a causa dell'elevata concentrazione di sali nel suolo.



Figura 3.4: Barene

I bassifondi e le velme invece sono zone formate da uno strato fangoso privo di vegetazione perché solitamente sommerso.

I canali a marea si distinguono in canali veri e propri e *ghebi*. I canali variando la loro profondità si diramano dalle bocche di porto fino all'interno del bacino lagunare, favorendo uno scambio d'acqua e di sedimenti tra i bassifondi e il mare aperto. I ghebi (figura 3.5) invece sono i rami più sottili dei canali, si spingono anche all'interno delle barene fino al confine con i bassifondi oppure fino ad allacciarsi ai canali presenti nei bassifondi stessi. La loro funzione è quella di vivificare le zone più interne della barena quando la marea non riesce ad inondarla.



Figura 3.5: Ghebo

Il lido o “cordone litoraneo” è la zona più estrema, che separa la laguna dal mare, e si estende per un totale di circa 60 km. I lidi, separati dalle bocche di porto, sono suddivisi in quattro segmenti, denominati da nord a sud: Cavallino, Lido, Pellestrina e Sottomarina. La sua evoluzione è regolata dal prevalere delle forze distruttive (fenomeni erosivi delle correnti e del moto ondoso) o di quelle costruttive (il ripascimento con nuova sabbia).

Altro elemento caratteristico della morfologia lagunare sono le valli da pesca, costituite da specchi acquei poco profondi e da addensamenti di barene, separati dalla laguna aperta da arginature che arrestano i flussi e i riflussi di marea. Sono bacini attrezzati per l'itticoltura fin dai tempi antichi, quando erano alimentati da canali secondari e dai relativi ghebi, che costituivano parte integrante del tessuto morfologico delle valli. La loro delimitazione era in parte realizzata con argini di fango, mentre 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.

Infine ci sono le casse di colmata, isole artificiali costruite con il materiale proveniente dallo scavo del Canale dei Petroli, che collega il mare al porto di Marghera. Sono localizzate a sud del porto industriale, in vista di un'ulteriore espansione della zona industriale, mai avvenuta. La loro costruzione ha provocato, oltre alla scomparsa delle barene in precedenza presenti in tale zona, una riduzione della quantità e qualità del ricambio idrico alle spalle delle casse di colmata stesse.

3.3 FENOMENI MORFOLOGICI E INTERVENTI ANTROPICI

L'evoluzione del sistema lagunare è dovuta sia a fattori naturali che antropici, i quali, in base al loro peso, contribuiscono ad incrementare i fenomeni di squilibrio morfologico oppure concorrono a stabilizzare il sistema. La tendenza attuale della laguna è quella della progressiva erosione dei bassifondi e delle barene, causandone una forte perdita di superficie e portando così l'ecosistema lagunare a un'inevitabile trasformazione. Parallelamente si evince un approfondimento e livellamento dei fondali, che ha annullato il ruolo idrodinamico dei canali lagunari nel controllo della propagazione della marea, modificando in questo modo il regime delle correnti. Il destino della laguna di Venezia sembra dunque quello di diventare un braccio di mare.

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 dal vento,
- la 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, perché 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.

Altri due fenomeni determinanti sono l'eustatismo, cioè l'innalzamento del livello medio del mare dovuto alle variazioni climatiche terrestri, e la subsidenza, cioè l'abbassamento del suolo, in genere connesso a cause naturali, ma che si può localmente aggravare per l'intervento dell'uomo,

come è successo in laguna di Venezia. La subsidenza naturale è dovuta al progressivo consolidamento per assestamento dei sedimenti sotto l'azione del proprio peso e, in misura minore, per i movimenti tettonici profondi. La subsidenza antropica invece riguarda la depressurizzazione degli acquiferi per estrazione eccessiva di acque artesiane, messa in atto dagli anni '20 agli anni '70, per raffreddare gli impianti industriali di Porto Marghera. Il pompaggio di conseguenza è stato vietato e la subsidenza antropica si è fermata, ma quella per cause naturali è tuttora in atto.

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

- la diversione dei fiumi,
- la 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 industriale,
- 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 interrimenti 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.

L'idrodinamica negli ecosistemi lagunari ha un ruolo determinante sia nei processi evolutivi geomorfologici, sia nelle variazioni delle caratteristiche geochimiche e biologiche dei sedimenti di fondo e della colonna d'acqua sovrastante. Ne risulta che le variazioni geomorfologiche del bacino lagunare veneziano, nei vari aspetti di erosione o sedimentazione, sono fortemente condizionate dalle prevalenti caratteristiche idrodinamiche della laguna. A queste, nei sistemi lagunari altamente urbanizzati ed industrializzati, quali la laguna di Venezia, si aggiunge l'effetto dell'impatto antropico diretto e indiretto, che rende molto più complesso il monitoraggio e la gestione dell'ecosistema lagunare.

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 ridistribuzione 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 deposizionali nel settore lagunare riveste quindi un ruolo di notevole importanza per la sopravvivenza della laguna stessa.

3.4 INQUINAMENTO AMBIENTALE ED EUTROFIZZAZIONE

Il tema dell'inquinamento ambientale assume particolare importanza se trattato per le zone costiere, poiché in esse si generano grandi quantitativi di materia organica che sostiene l'intera catena alimentare marina. Tutti i sistemi lagunari, come la laguna di Venezia, possiedono un delicato ecosistema che contiene una grande varietà di forme di vita e, per questo motivo, ha necessità di essere tenuto sotto controllo e protetto da fattori inquinanti e di squilibrio. Nonostante queste acque rappresentino meno del 15% della superficie terrestre e circa lo 0,5% del volume degli oceani, da esse deriva il 90% delle risorse ittiche. Contemporaneamente, le attività antropiche determinano rilevanti flussi inquinanti per le zone costiere, che determinano l'instaurarsi di processi di degrado, in termini di riduzione della biodiversità, perdita di habitat, inquinamento delle acque e dei sedimenti, rischi tossicologici e deterioramento del paesaggio.

L'inquinamento delle acque nella laguna di Venezia è un fenomeno molto complesso, dovuto alla molteplicità delle fonti inquinanti e alla peculiarità dell'ambiente. La laguna è infatti usata come corpo ricevente delle acque di scarico di tutta una serie di attività produttive e insediamenti urbani. In totale, il 47% dell'inquinamento della laguna è dovuto a fonti industriali, civili e urbane e il 53% a fonti agricole e zootecniche.

Innanzitutto il carico inquinante dei centri abitati della laguna, che scaricano direttamente in acqua, rappresenta una componente non trascurabile dell'inquinamento di origine civile dell'intero bacino. A questa componente fanno parte 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.

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.

Anche i comuni dell'entroterra veneto, che scaricano le loro acque nei corsi d'acqua scolanti in laguna, contribuiscono all'inquinamento della stessa. L'acqua proveniente dall'entroterra contiene diversi inquinanti, con differente concentrazione e pericolosità ambientale, trasportati sia in forma disciolta sia in associazione alle particelle inorganiche e 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 perché 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 *eutrofizzazione* (dal greco *eutrophòs* = ben nutrito) che si sta sviluppando nella laguna di Venezia. Si riferisce al processo di arricchimento in nutrienti, soprattutto di fosforo e azoto, degli ecosistemi acquatici, in grado di alterare più o meno profondamente il loro stesso equilibrio, fino a compromettere, in casi estremi, la loro esistenza.

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, che 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, ad esempio i tempi-scala, 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.

Nel presente lavoro, in cui si sono stimati in modo puntuale l'età dell'acqua e il tempo di residenza nella laguna di Venezia, è chiaro che si verifica un minore ricambio idrico dove questi tempi-scala assumono valori più elevati.

Capitolo 4

GLI STRUMENTI DI CALCOLO

Nel presente capitolo si vogliono descrivere gli strumenti utilizzati per l'analisi dell'età dell'acqua e del tempo di residenza nella laguna di Venezia.

4.1 INTRODUZIONE

Per l'analisi della capacità di ricambio idrico della laguna di Venezia è necessario conoscere in modo preciso e puntuale le caratteristiche idrodinamiche che si instaurano nel bacino quando è sottoposto all'azione periodica delle onde di marea.

Nella discussione che segue, infatti, si assumono condizioni stazionarie, o meglio periodiche. Analisi più complesse che considerano, ad esempio, una marea astronomica o una marea reale, forniscono indicazioni più precise ma al tempo stesso meno significative, essendo più complessa l'analisi e la discussione dei risultati. Inoltre, se il periodo della marea astronomica è, come è facile che accada, confrontabile con il tempo-scala che si sta analizzando, ad esempio il tempo di residenza, in una frazione non trascurabile di bacino, l'istante iniziale in cui viene immesso del tracciante ha un'influenza notevole sui risultati. Lo stesso si può affermare per l'effetto del vento, che spesso produce sensibili incrementi dell'intensità dei processi di mescolamento. Anche in questo caso, però, l'analisi si complica notevolmente pensando che, in generale, durante la stagione invernale i venti sono più forti e più frequenti, mentre in quella estiva si è in presenza di venti più deboli. Ciò chiaramente influenza i risultati che si ottengono, assumendo istanti iniziali diversi durante l'arco di un anno. Anche se l'anno fosse molto più grande del tempo di residenza,

se il vento rende sensibili i processi di mescolamento, il tempo di residenza come “indicatore” perde significatività.

Un altro aspetto, legato a questi, è determinato dal fatto che in un bacino soggetto quasi esclusivamente all’azione della marea, i tempi-scala sono fortemente dipendenti dai processi di mescolamento, quindi dall’effetto della diffusione. Il modello deve quindi essere in grado di descrivere bene la diffusione. Questo è invece spesso trascurato nella letteratura, dove le valutazioni non danno importanza alla raffinatezza della griglia di calcolo e alla distribuzione dei coefficienti di dispersione.

Lo modello numerico (2DEF) che implementa la soluzione discreta del sistema di equazioni differenziali che governa il problema e che simula i processi diffusivi è stato sviluppato internamente al dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA) dell’Università di Padova.

Il modulo idrodinamico risolve, con una tecnica agli elementi finiti, le equazioni per le onde lunghe in acque basse. Il modulo prevede la discretizzazione del campo di moto mediante elementi triangolari 2D accoppiati ad elementi lineari 1D. Le equazioni del moto nelle direzioni orizzontali x , y mediate sulla verticale e l’equazione di continuità sono le seguenti [D’Alpaos e Defina, 1995; Defina, 2000]:

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

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{Y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{Y} \right) - \left(\frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{by}}{\rho} - \frac{\tau_{wy}}{\rho} + gY \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\eta \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

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, \mathbf{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 $\boldsymbol{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ è lo sforzo tangenziale al fondo espresso dalla seguente equazione:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = gY \left(\frac{|\mathbf{q}|}{k_s^2 H^{10/3}} \right) \mathbf{q} \quad (5)$$

in cui k_s è il coefficiente di scabrezza secondo Strickler.

Nelle equazioni (2), (3) e (4) 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 [Defina, 2000]:

$$\eta(h) = \frac{I}{2} [1 - \text{erf}(2D/a_r)] \quad (6)$$

$$Y = \int_{-\infty}^h \eta \cdot dz = a_r \left(\eta \frac{D}{a_r} + \frac{I}{4\sqrt{\pi}} e^{-4(D/a_r)^2} \right) \quad (7)$$

$$H \cong Y + 0.27\sqrt{Y \cdot a_r} \cdot e^{-2Y/a_r} \quad (8)$$

in cui erf() è la funzione errore, $D = h - z_b$ 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:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{q_x}{Y} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{q_y}{Y} \frac{\partial C}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) = f(C) \quad (9)$$

in cui C è la concentrazione media sulla verticale del materiale trasportato, \mathbf{D} è il tensore della diffusione e $f(C)$ descrive la cinetica della sostanza. Nel caso di sostanza conservativa (ad esempio un tracciante) si ha $f(C) = 0$. Nel caso di specie, in cui la concentrazione della sostanza conservativa è l'età dell'acqua, il termine $f(C)$ vale 1.

Nel modello, il tensore \mathbf{D} della diffusione si riduce al 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. L'equazione (8) pertanto diventa:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{q_x}{Y} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{q_y}{Y} \frac{\partial C}{\partial y} - D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) = f(C) \quad (10)$$

la quale è risolta numericamente mediante una tecnica ai volumi finiti. Alla precedente relazione vanno ovviamente associate le opportune condizioni al contorno.

Il modello di calcolo richiede innanzitutto la definizione di un file .geo, contenente il 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 di 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.

Accanto al modello, si utilizza il programma *Incidenze 2.3*, che consente la visualizzazione e l'elaborazione dei dati e dei risultati relativi alle simulazioni effettuate con il modello di calcolo. Questo programma è un software interattivo a finestre e fornisce gli strumenti per la generazione, la visualizzazione e la modifica del reticolo di calcolo. Consente inoltre di visualizzare il file delle condizioni al contorno delle simulazioni (.sim) e dei risultati ottenuti (.out), rappresentando graficamente i parametri idrodinamici forniti dal modello, quali, ad esempio, livelli, tiranti, portate, velocità, sforzi al fondo. 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 dei tempi-scala oggetto di studio.

4.2 IL DOMINIO DI CALCOLO (.geo)

Il file .geo, fornito dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova, contiene la definizione planimetrica 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.

La successiva discretizzazione spaziale del dominio, affidata al software *Incidenze*, prevede la creazione degli elementi monodimensionali (nodi) e bidimensionali (maglie triangolari) che formano la cosiddetta *mesh*, su cui applicare le equazioni che descrivono il problema idraulico. La possibilità di controllare il passo di discretizzazione (ovvero la dimensione media del lato delle maglie) consente di rappresentare in modo diverso, più o meno raffinato, parti diverse del dominio. 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.

In figura 4.1 è rappresentato il dominio di calcolo utilizzato, costituito da 98.433 maglie triangolari e da 51.724 nodi. 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.

Il grado di affinamento della mesh, come si vede dalla figura 4.2, è molto più spinto per la rappresentazione delle bocche di porto, cioè 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 gradualmente delle condizioni di moto.

Definita la geometria planimetrica, il file .geo necessita dell'assegnazione, ad ogni maglia del dominio, degli ultimi parametri che completano la descrizione fisica del territorio, che sono:

- la quota del fondo (h_f) rispetto al livello medio del mare, definito dal valore medio della maglia, cioè dalla quota del suo baricentro,
- il valore del coefficiente di Gauckler-Strickler (k_s), che tiene conto della resistenza al moto introdotta dalla scabrezza del fondo,
- il valore delle asperità del fondo (a_r), che non riveste un vero e proprio significato fisico, ma è utilizzato per discriminare il passaggio dalla condizione di maglia asciutta alla condizione di maglia sommersa. Si tratta di un fenomeno di discontinuità che le sole equazioni del moto non permettono di gestire.

Nella figura 4.3 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.

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 4.3, 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.

Nella figura 4.3, il dominio è sovrapposto ad una rappresentazione del territorio ottenuta tramite ortofoto aeree: entrambi gli elementi sono georeferenziati secondo il sistema di riferimento Gauss-Boaga, consentendo una perfetta sovrapposizione delle immagini. Si è inoltre

inserito un file .cnt contenente i poligoni che individuano le superfici della laguna di Venezia relative alle barene, aventi quote del fondo superiori a 0,25 m sul livello medio del mare.

Per la rappresentazione del coefficiente di Strickler, come si può vedere in figura 4.4, si sono scelti cinque valori da assegnare alle maglie del dominio, 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.

Si ricorda che all'aumentare del valore di k_s diminuisce la resistenza del fondo e viceversa.

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

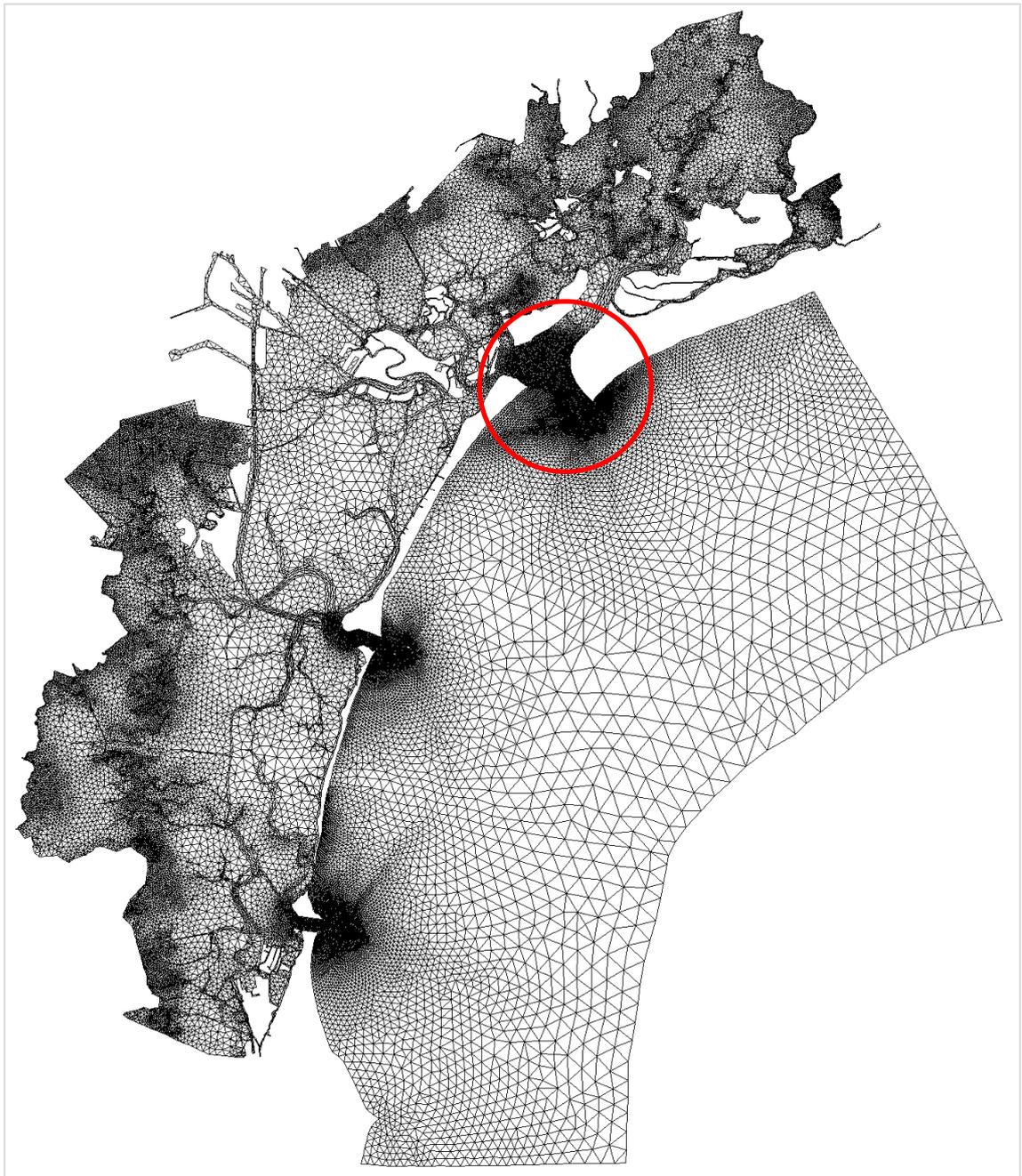


Figura 4.1: Dominio di calcolo

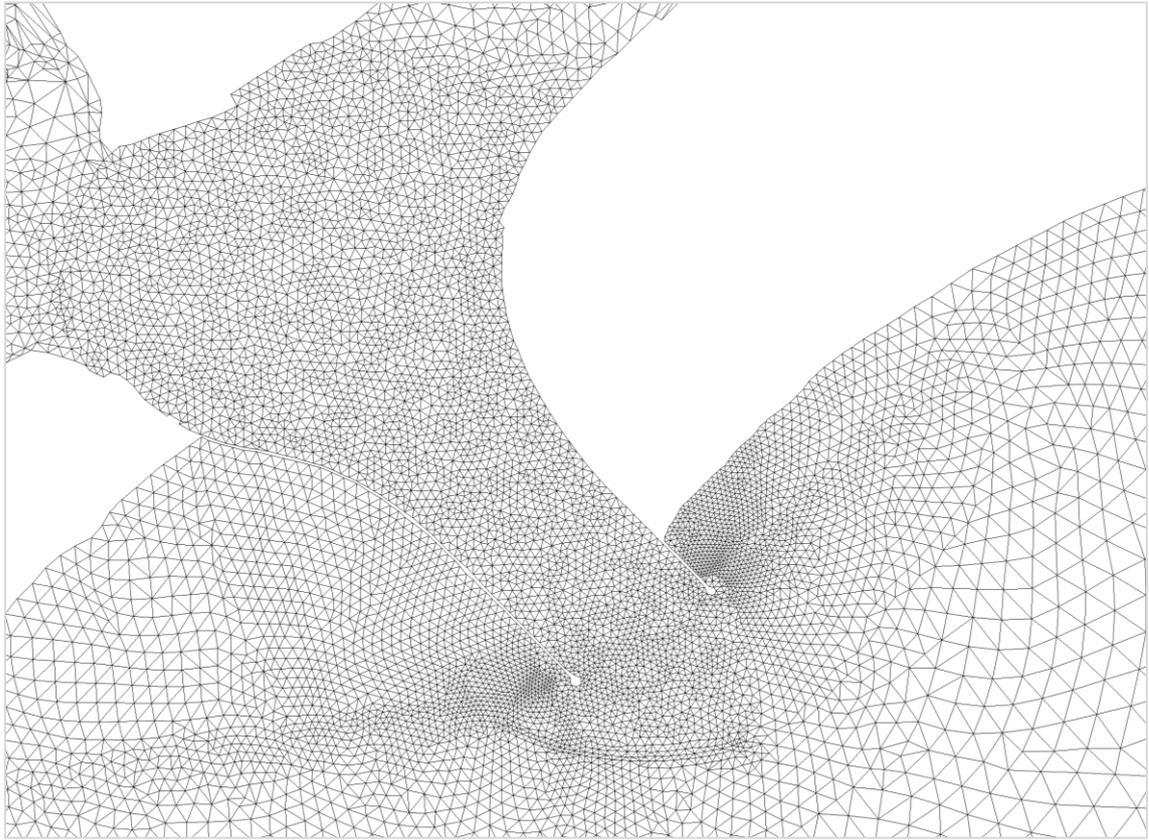


Figura 4.2: Affinamento della mesh (bocca di Lido)

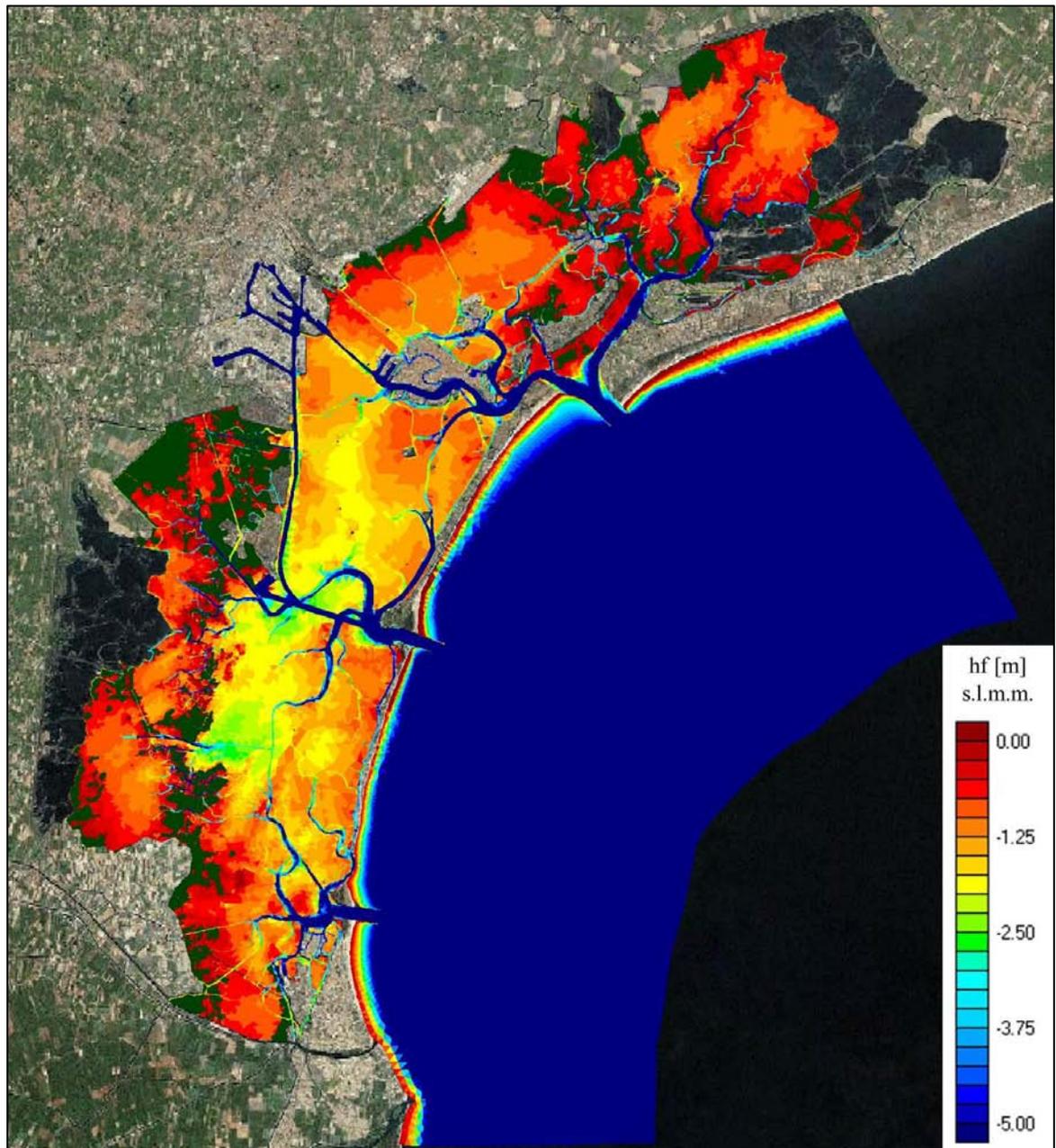


Figura 4.3: Quote del fondo

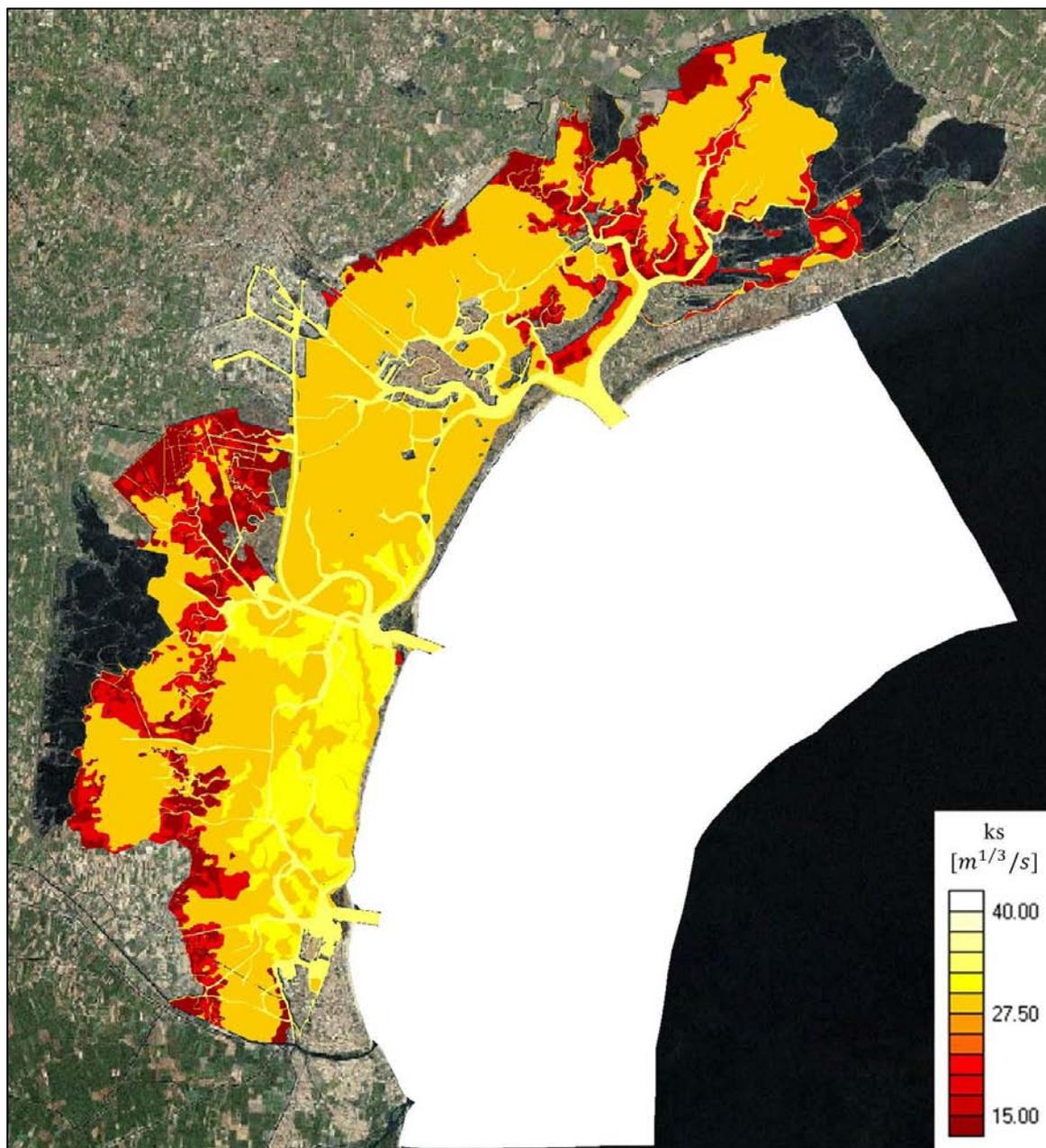


Figura 4.4: Distribuzione del coefficiente di Gauckler-Strickler

4.3 ISTRUZIONI E CONDIZIONI AL CONTORNO (.sim)

Il file .sim, compilato dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova, contiene le istruzioni e le condizioni al contorno necessarie al modello di calcolo. È un file testo che si articola in diversi gruppi di dati e che dà le specifiche della simulazione. Si illustrano ora le caratteristiche più salienti del file e le scelte effettuate per le simulazioni.

1. Dati generali della simulazione

In questa prima parte si definiscono la durata della simulazione, il passo temporale di calcolo, il passo temporale di stampa dei risultati, tutti espressi in secondi, e la possibilità o meno di poter visualizzare sul video la stampa dei risultati (1/0). È richiesta, poi, l'indicazione del nome del file .geo, che costituisce l'input della simulazione, e del nome del file .out, che è l'output della simulazione. Infine c'è la possibilità o meno di calcolare l'idrodinamica (1/0).

Si è scelto di eseguire simulazioni ripetute della durata di 432.000 secondi, che sono cinque giorni, al fine di leggere e valutare i risultati con frequenze relativamente brevi, considerato che per l'età dell'acqua e il tempo di residenza si parla di mesi. Si è utilizzato un passo di calcolo di 2 secondi e di stampa delle variabili di 1800 secondi. Inoltre, essendo che viene considerata un'idrodinamica costante, per non appesantire i calcoli, non viene calcolata in ogni simulazione, ma viene imposta da un file .out contenente l'idrodinamica lagunare.

2. Lista delle variabili da stampare

In questa parte si definiscono i parametri che si vuole vengano calcolati dal modello, 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 dovute alla diffusione.

3. Condizioni iniziali

In questa fase si definisce o meno la lettura da restart (1/0). In caso affermativo si indica il nome del file .bup che fotografa la situazione all'ultimo istante della simulazione precedente e che costituisce l'istante iniziale della simulazione corrente. Il .bup costituisce quindi un file output per la simulazione precedente, mentre è un file input per quella corrente.

Ad ogni simulazione pertanto il file .bup deve essere aggiornato.

4. Tabelle dei dati variabili nel tempo

È necessario stabilire il numero delle tabelle che si inseriscono (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 di specie ci si è serviti di due tabelle: una per i livelli in mare, che simulano l'andamento sinusoidale dell'onda di marea, e una per le concentrazioni in mare, imposte pari a zero.

5. Condizioni al contorno

Vengono ora indicati i nodi del dominio di calcolo, così come numerati nel file .geo, sui quali applicare le condizioni al contorno relative ai livelli, definiti dalle tabelle del punto precedente. Si procede 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.

Come si può notare in figura 4.5, sono evidenziati i 105 nodi sul lato del mare sui quali è stata imposta la condizione al contorno sopra descritta. Questa immagine si ottiene in Incidenze, il quale consente di selezionare gli elementi del file .sim che si vogliono visualizzare, evidenziando con dei simboli colorati i nodi su cui sono applicate le condizioni al contorno.

6. Dati per il trasporto e la diffusione

In questa parte 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 del punto 4. 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.

È quindi in questa parte che si inserisce l'.out dell'idrodinamica lagunare e i 105 nodi sui quali è imposta la condizione al contorno relativa alle concentrazioni, gli stessi in cui si impone il livello di marea nella simulazione idrodinamica (figura 4.5).

7. 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.

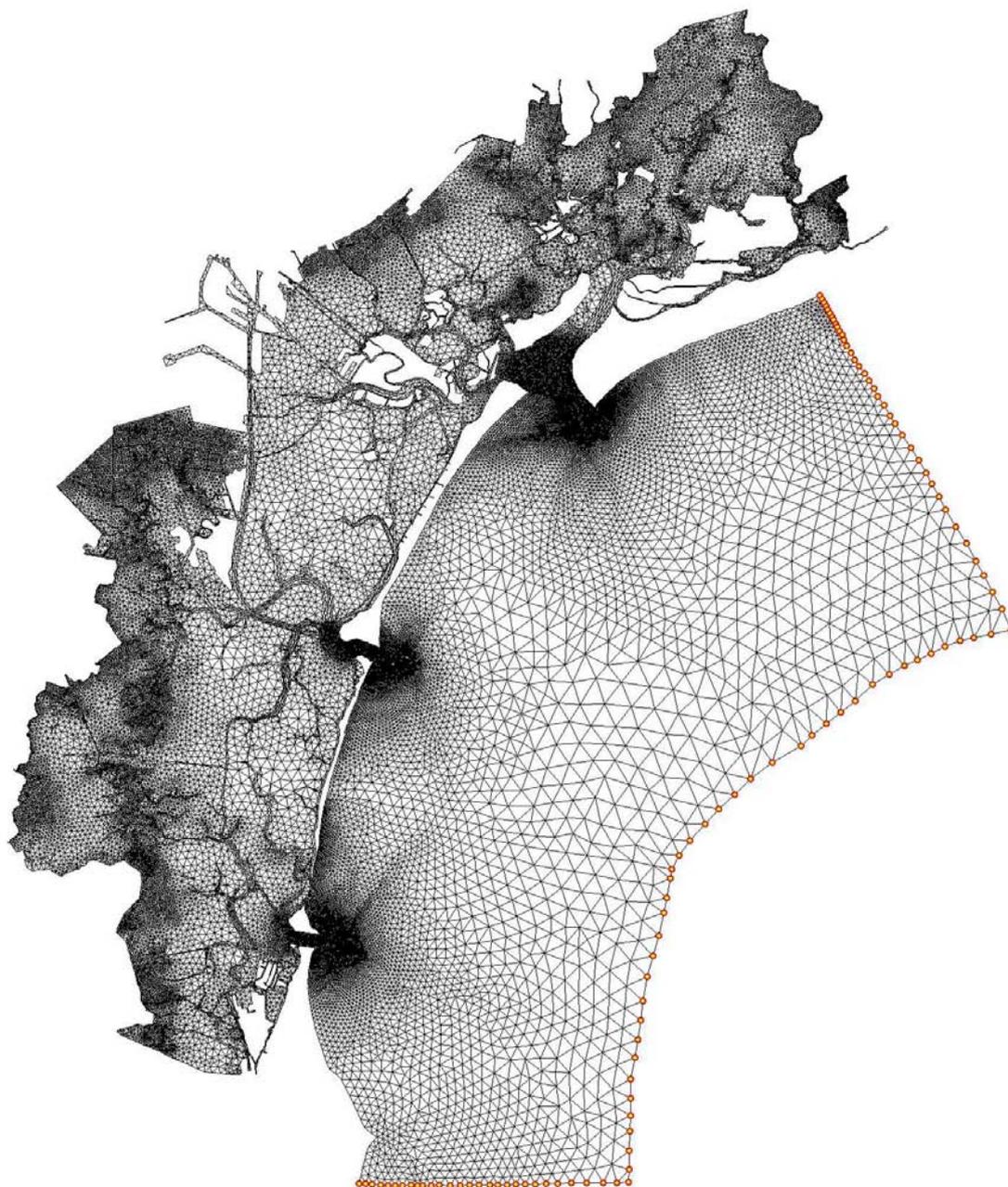


Figura 4.5: Nodi del dominio con livelli e concentrazioni imposte nel tempo

4.4 RISULTATI DELLA SIMULAZIONE (.out)

I risultati delle simulazioni e il commento di questi saranno l'oggetto principale del capitolo successivo. In questo paragrafo si vuole tuttavia descrivere operativamente come si sono utilizzati i files .out.

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. La visualizzazione in Incidenze però riguarda solo i livelli nel tempo, mentre è d'interesse per questa analisi l'andamento delle concentrazioni.

Per ovviare a ciò si deve utilizzare un programma, fornito dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova, in grado di sostituire ai livelli le concentrazioni calcolate dal modello. L'input di tale programma è l'.out del modello, mentre l'output è un altro file .out che, aperto in Incidenze, permette di visualizzare le concentrazioni al posto dei livelli.

È quindi possibile visualizzare in Incidenze l'andamento delle concentrazioni nel tempo, ma solamente nell'arco di tempo della durata di una simulazione, che è di cinque giorni. Per avere l'andamento continuo di più simulazioni successive si possono esportare in un file .txt, per ciascuna simulazione, le concentrazioni al variare del tempo in alcuni punti scelti nel dominio e importarle successivamente in un foglio di calcolo (ad esempio Excel), facendo attenzione a rimuovere o l'istante finale della simulazione precedente o l'istante iniziale della simulazione corrente perché sono coincidenti. Si può quindi graficare l'andamento dei risultati in periodi più lunghi, dell'ordine di grandezza dei tempi-scala, fornendone così una prima approssimazione.

Per dare una prima stima di questi tempi la prima cosa da fare, a partire dagli .out delle simulazioni effettuate, è quella di mediare sulla marea i valori ottenuti, sia per l'età dell'acqua, sia per il tempo di residenza, al fine di ottenere un andamento più chiaro delle curve. Si può fare questa operazione anche con Excel e si valutano gli andamenti per alcuni punti del dominio, presi arbitrariamente. Riguardo all'età, se l'andamento nel tempo in una prima fase cresce, poi tende a diventare costante allora significa che si è raggiunta l'età a regime, poiché l'invecchiamento si compensa con il ringiovanimento, dovuto al mescolamento delle particelle. Riguardo al tempo di residenza, se il rapporto tra la concentrazione all'istante C e quella all'istante iniziale C_0 scende sotto la soglia $1/e$ allora si può definire il tempo di residenza di una particella.

Sulla base di queste valutazioni preliminari sui files .out delle simulazioni effettuate, si è scelto di proseguire con le simulazioni fino a quattro mesi, sia per l'età dell'acqua sia per il tempo di residenza.

Capitolo 5

APPLICAZIONE ALLA LAGUNA DI VENEZIA

In questo capitolo si vogliono analizzare i risultati ottenuti nello studio dell'età dell'acqua e del tempo di residenza nella laguna di Venezia, al fine di confrontarli e vedere se le deduzioni teoriche trovano conferma nell'applicazione pratica.

5.1 MODELLI IMPIEGATI

Si sono effettuate simulazioni successive per l'età dell'acqua e per il tempo di residenza. Da un punto di vista pratico si è operato analogamente per i due tempi-scala, ma si sono utilizzati modelli diversi, che si basano sulla definizione di età e di tempo di residenza. Infatti dal modello che simula l'età dell'acqua si ottiene l'andamento della concentrazione C nel tempo, mentre da quello che simula il tempo di residenza si ottiene il rapporto C/C_0 in funzione del tempo. Ciò che è diverso, oltre ai modelli, sono soprattutto le condizioni iniziali: per l'analisi dell'età si parte da una condizione in laguna e in mare di concentrazione nulla, mentre per lo studio del tempo di residenza si impone in laguna una concentrazione unitaria e in mare nulla, pertanto ciò che si ottiene imponendo C_0 unitario diventa, come per l'età, l'andamento di C nel tempo.

In entrambi i casi si sono ritenute sufficienti simulazioni della durata complessiva di quattro mesi. Dopo questo periodo di tempo, infatti, da una prima stima a vista dei file .out del modello, l'età sembra diventare costante, pari al suo valore a regime A , e anche il tempo di residenza sembra essere definito poiché l'esponentiale sembra sceso sotto la soglia $1/e$.

A questo punto si è potuta fornire una stima più accurata di entrambi i parametri. Operativamente, 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 quattro mesi di simulazione. In un secondo momento ci si serve di altri due programmi forniti dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova, che utilizzano come input il file .out complessivo appena creato. Per l'età dell'acqua il programma fornisce come output due files .bup: uno è un'estrapolazione a tempo tendente ad infinito dell'età dell'acqua, l'altro è il rapporto tra l'età calcolata nell'ultima simulazione e l'età estrapolata. Per quanto riguarda il tempo di residenza, invece, il programma applica la definizione per i punti dove si è raggiunta la soglia $1/e$, mentre dove non è raggiunta con le simulazioni impone un valore pari a 999 giorni, fornendo come output un file .bup contenente il tempo di residenza nell'intero dominio.

Infine, dalla ricostruzione dei due tempi-scala si possono fare i confronti necessari a giustificarne o meno la loro equivalenza.

5.2 VALUTAZIONE DELL'ETÀ DELL'ACQUA

Si vogliono ora indagare i risultati ottenuti per l'età dell'acqua nella laguna di Venezia.

Come si è spiegato, il modello calcola l'andamento nel tempo della concentrazione ma, essendo la grandezza d'interesse l'età dell'acqua, si fa riferimento all'analogia che lega questi due parametri, ricavando quindi l'età in funzione del tempo.

Si considerano alcuni punti del dominio (figura 5.1), rappresentativi della disomogeneità di comportamento della laguna. In particolare, si sono scelti cinque punti: uno nella laguna superiore (punto rosso), posto particolarmente a nord; due nella laguna centrale, uno a nord (punto verde) e uno a sud (punto blu) della città di Venezia; uno nella laguna posteriore (punto rosa) e infine uno nella laguna inferiore (punto azzurro).

Ci si aspetta che i punti più vicini alle bocche di porto, cioè i punti blu e azzurro, siano più influenzati dai processi di mescolamento e quindi che l'età si attesti su valori inferiori rispetto ai punti più lontani dalle bocche e dai canali interni come quello rosso e quello rosa.

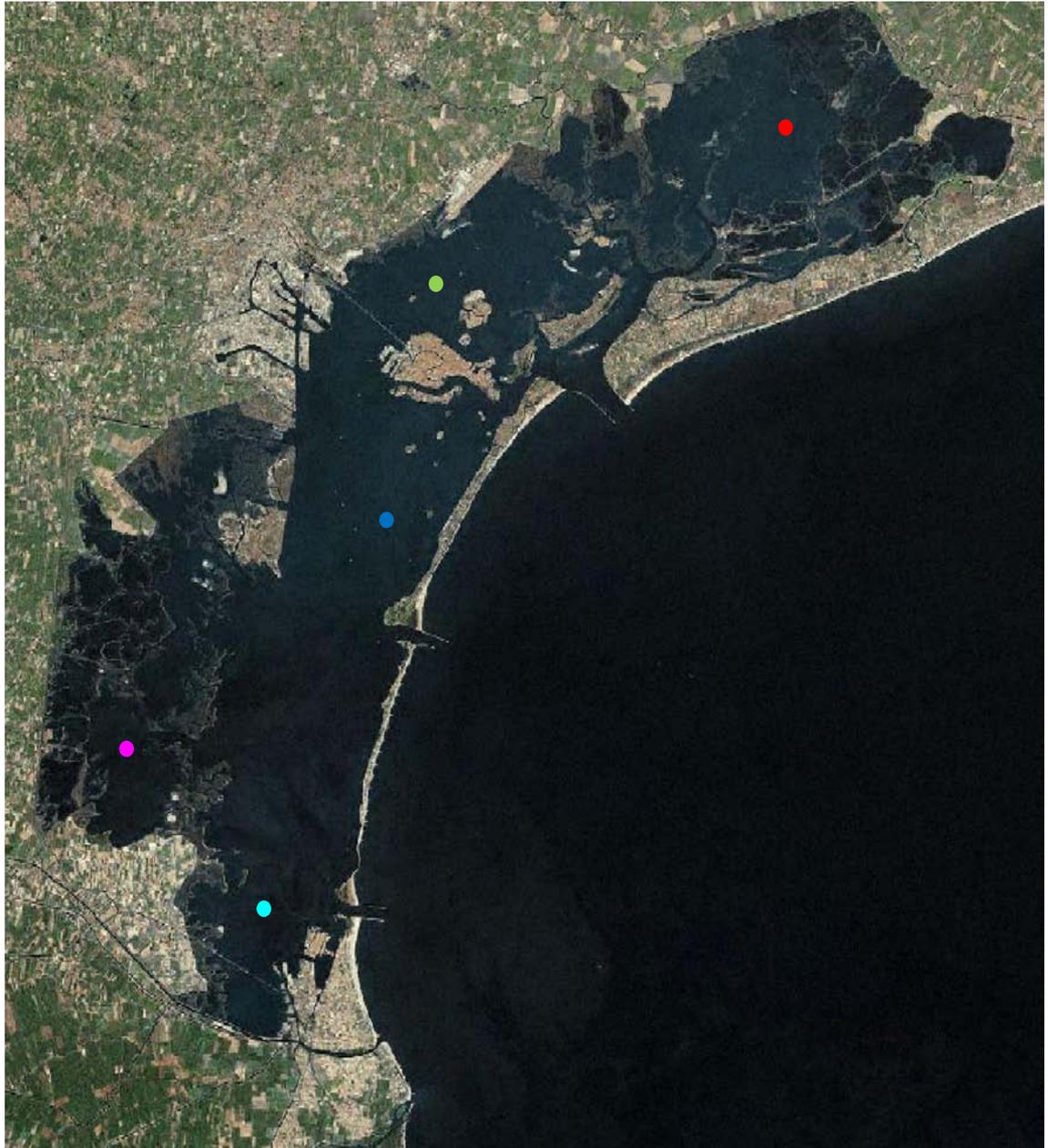


Figura 5.1: Punti rappresentativi del dominio

Si riporta in figura 5.2 un esempio di output dell'età relativamente a quindici giorni, cioè sovrapponendo tre simulazioni di cinque giorni.

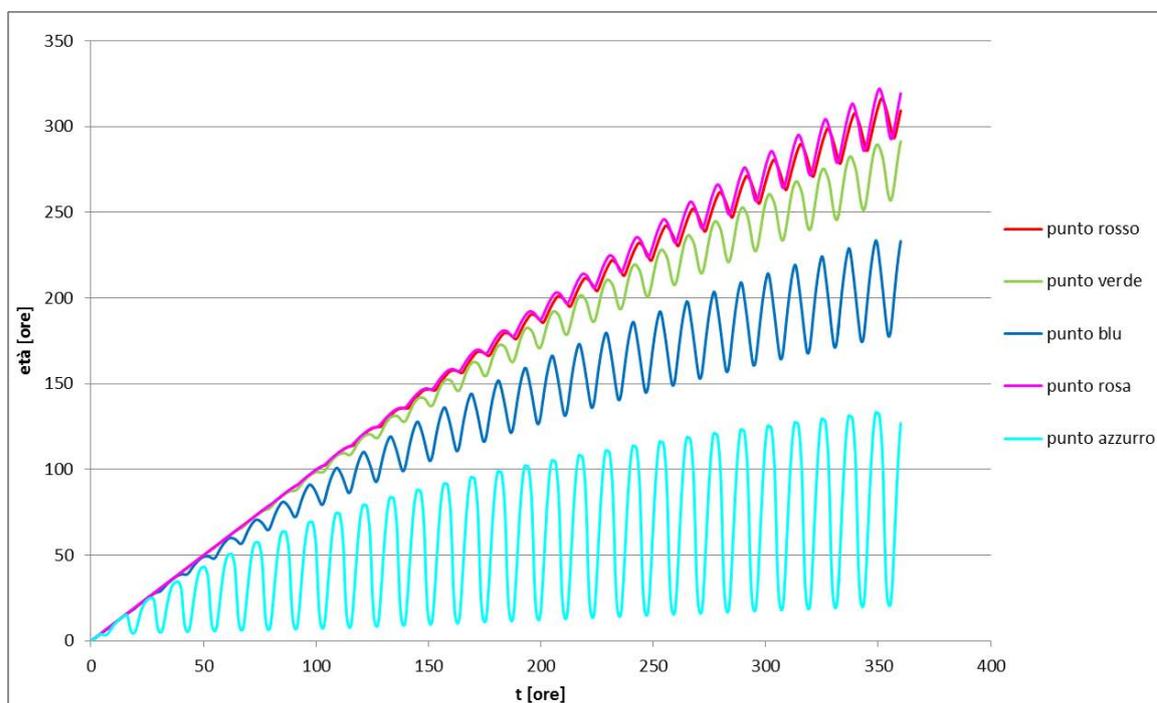


Figura 5.2: Andamento dell'età nel tempo in cinque punti del dominio (360 ore)

Si osserva, come si era previsto, che più ci si allontana dalle bocche di porto meno il mescolamento tra le particelle contribuisce alla riduzione dell'età. Per i punti più lontani, quello rosso e quello rosa, l'età nei primi quindici giorni di simulazione sembra crescere linearmente, mentre per il punto azzurro, molto vicino alla bocca di Chioggia, l'età risente molto del mescolamento con particelle più giovani.

In questo grafico si osserva inoltre, per ciascuna curva, l'andamento sinusoidale dovuto alla marea. Per i punti più vicini alle bocche l'oscillazione mareale è notevole, mentre per quelli più lontani la marea risulta alquanto smorzata. Ciò è dovuto principalmente alla resistenza al moto che il flusso incontra nel suo percorso: la zona superiore e la zona posteriore infatti sono caratterizzate dalla presenza della maggior parte delle superfici barenali.

Per capire meglio come il mescolamento influenza l'andamento dell'età, si possono considerare ancora i primi quindici giorni di simulazione e valutare una sequenza di immagini (figura 5.3).

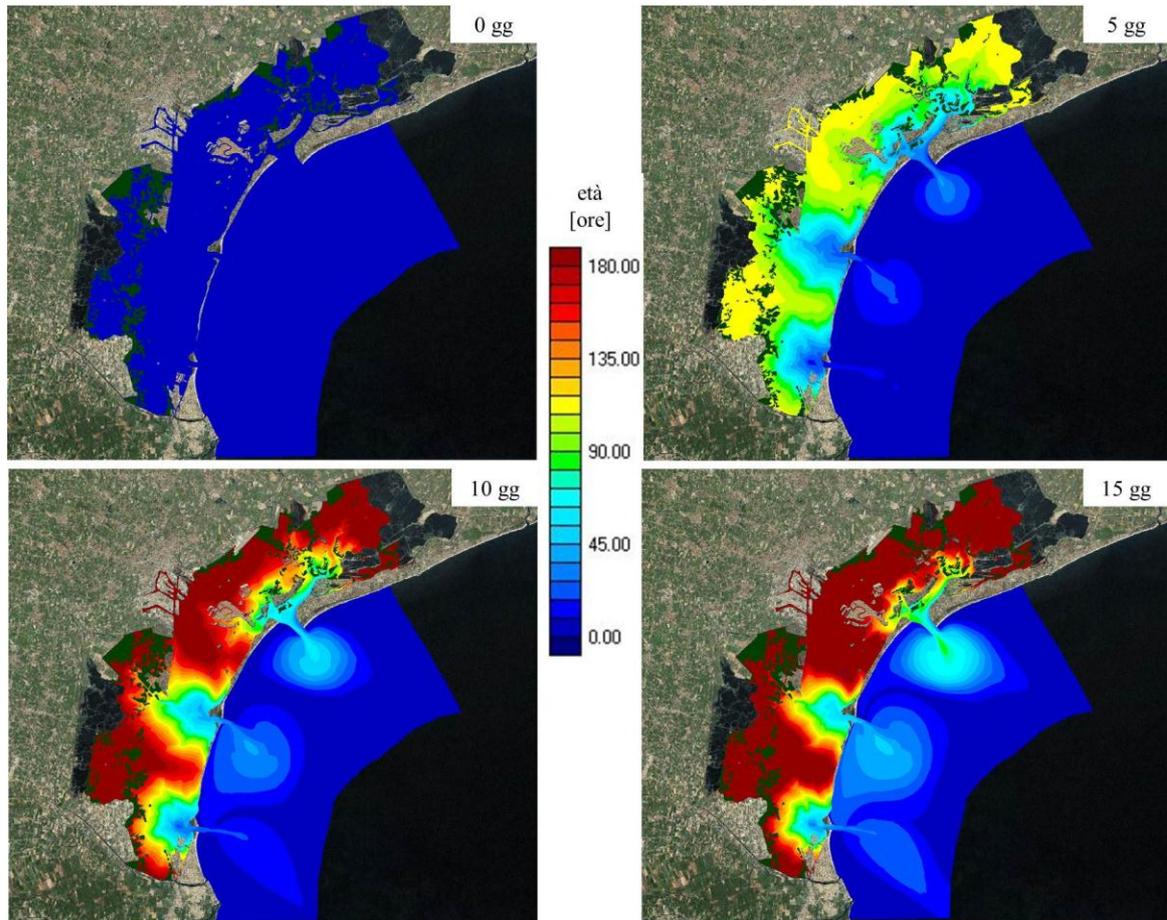


Figura 5.3: L'età della laguna in una sequenza temporale

Si osserva che le zone marginali sono quelle di minor ricambio d'acqua, cioè sono quelle in cui il mescolamento con le particelle giovani del mare è notevolmente ridotto.

Finora si sono considerati i risultati del modello non depurati dall'onda di marea, ma sarebbe più significativo ricavare un andamento intermareale dell'età, facendo la media sulla marea. Per fare questa operazione 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 rappresentano i risultati in figura 5.4, relativi ai punti considerati precedentemente (figura 5.1) per la complessiva durata delle simulazioni, pari a quattro mesi, cioè a centoventi giorni.

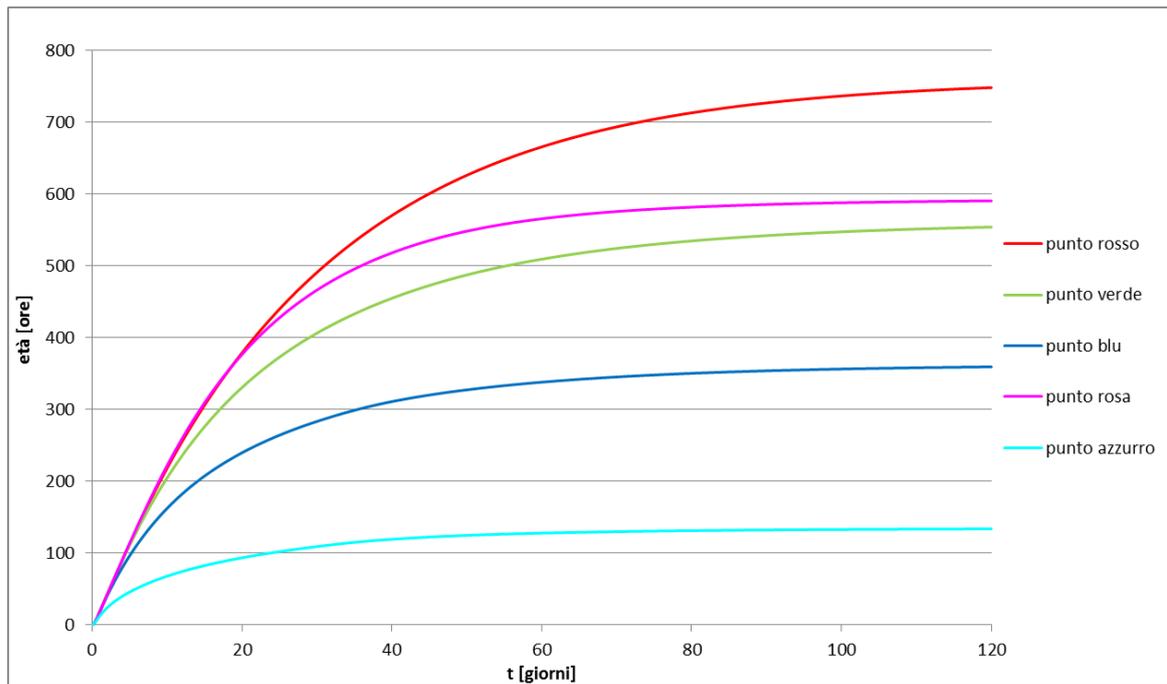


Figura 5.4: Andamento dell'età nel tempo in cinque punti del dominio (120 giorni)

Ora è ben chiara la disomogeneità dei risultati nelle diverse zone della laguna. Come già si è notato per i quindici giorni di simulazione, ora si ha la conferma che il punto rosso, quello rosa e anche quello verde si attestano su valori alti dell'età, pari rispettivamente a circa 750 ore, 600 ore e 550 ore, il punto blu raggiunge valori intermedi, pari a circa 350 ore, mentre il punto azzurro ha un'età sensibilmente più bassa pari a circa 120 ore.

Questi valori sono tuttavia solamente indicativi, anche se le curve del grafico sono già pressoché costanti. A rigore, infatti, si raggiunge il valore dell'età A , o meglio la curva tende all'intercetta A , per un tempo t che tende ad infinito. È questo il motivo per cui l'età può risultare scomoda nel calcolo, il fatto che è definita solamente per $t = \infty$ ore, mentre il tempo di residenza, una volta che il rapporto C/C_0 raggiunge la soglia $1/e$, è univocamente trovato.

Si vuole pertanto verificare la bontà di calcolo dell'età studiata. Come annunciato nel paragrafo 5.1, si è utilizzato un programma per estrapolare l'età dell'acqua e verificare se i valori trovati dopo quattro mesi di simulazione sono effettivamente una buona approssimazione.

In figura 5.5 si riporta l'immagine ottenuta con Incidenze del file .bup relativo all'estrapolazione dell'età nella laguna di Venezia.

In seguito, in figura 5.6, è rappresentata una sorta di controllo dei calcoli effettuati, si tratta del file .bup relativo al rapporto tra l'ultimo valore dell'età calcolato e il relativo valore dell'età estrapolata. Pertanto, tanto più tale rapporto sarà vicino ad 1, tanto migliore sarà l'approssimazione calcolata.

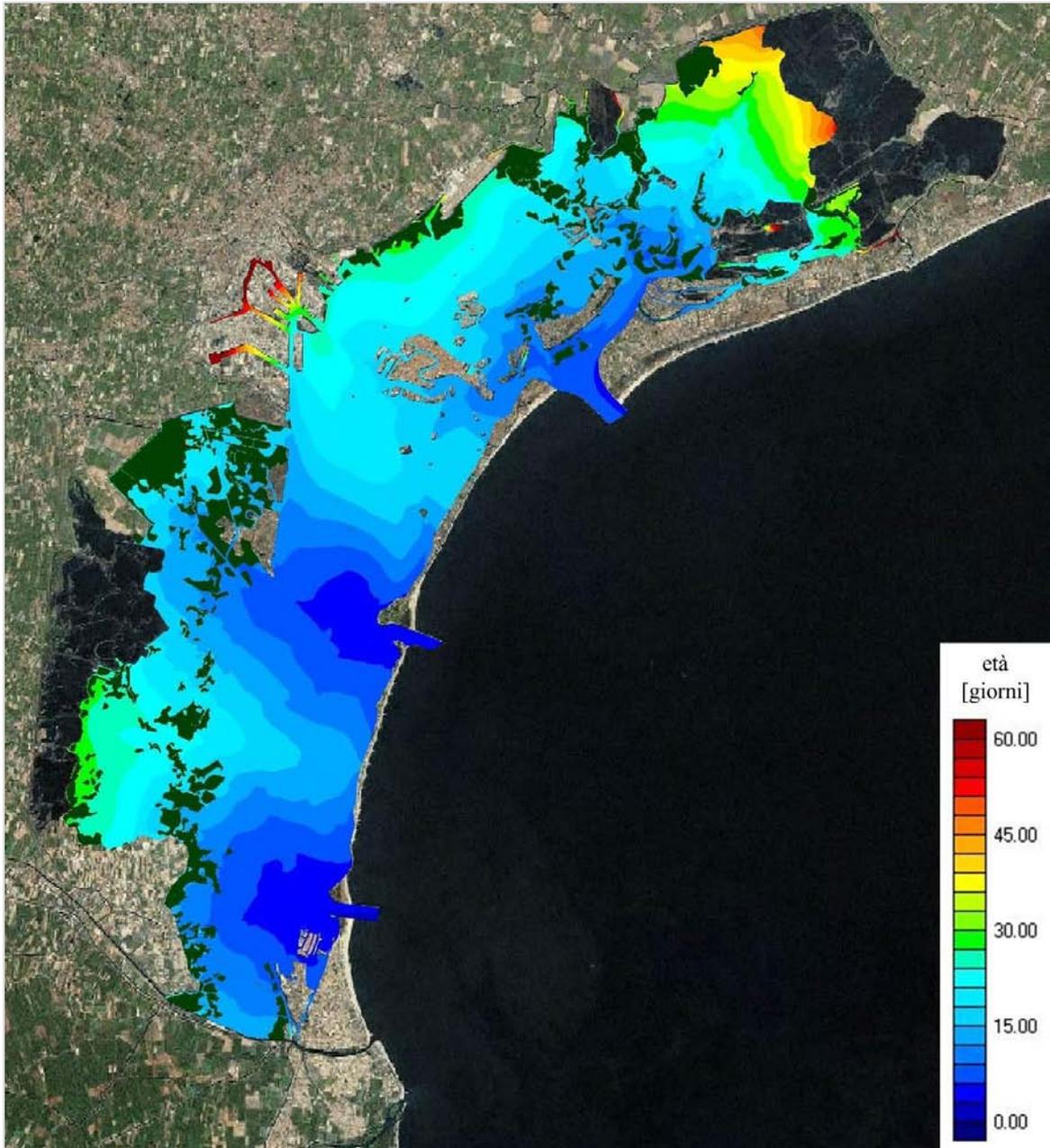


Figura 5.5: Estrapolazione dell'età dell'acqua nella laguna di Venezia

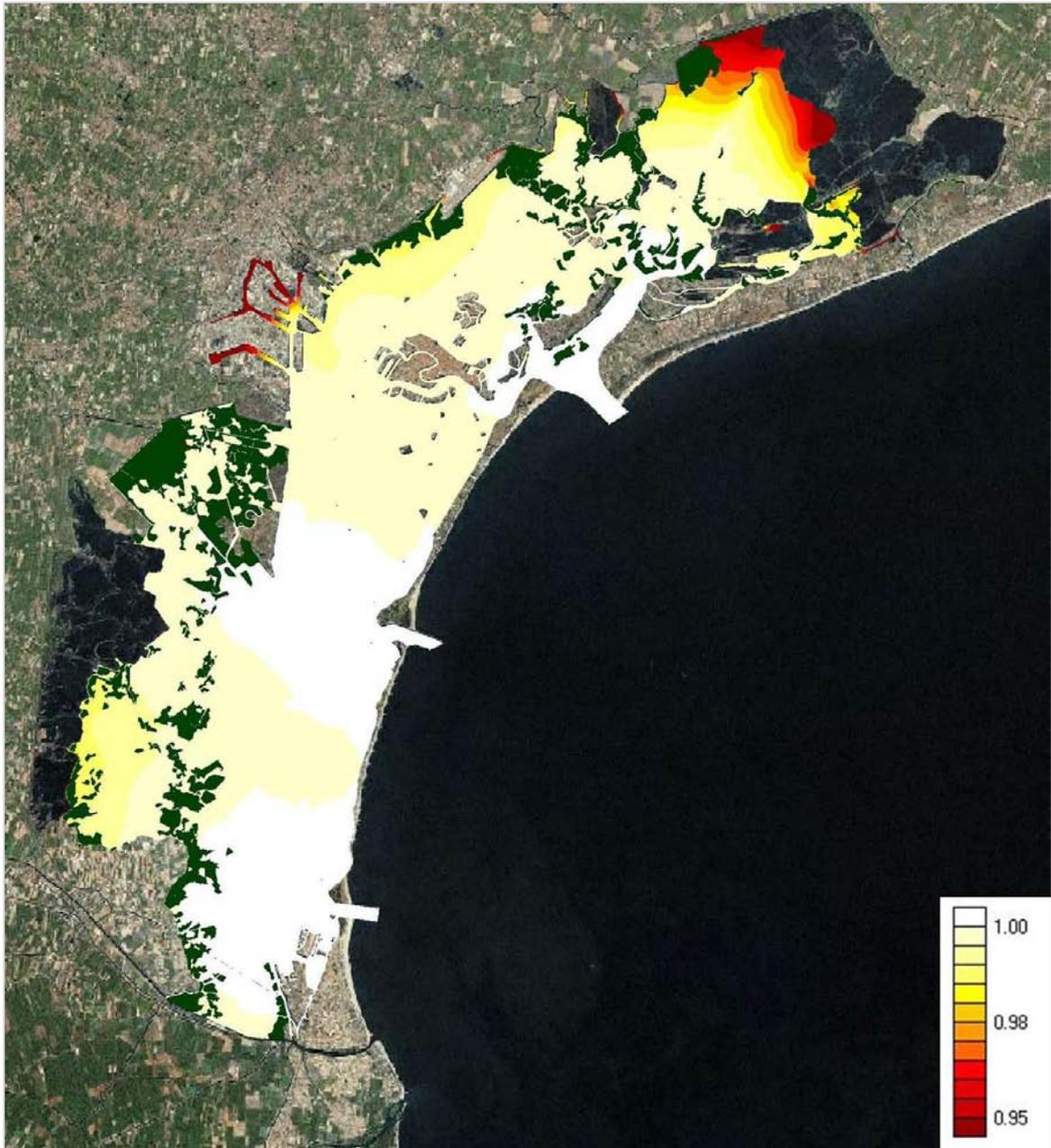


Figura 5.6: Rapporto adimensionale tra l'ultimo valore dell'età calcolato e l'età estrapolata

5.2.1 L'età dell'acqua con diffusione

Tutta l'analisi fatta per l'età dell'acqua si è ripetuta utilizzando un modello diverso, che tiene conto della diffusione, al fine di valutare l'importanza del termine diffusivo. Ricordando l'equazione della concentrazione risolta dal modello:

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

nel caso di analisi senza diffusione viene trascurato il termine legato al coefficiente di diffusione D e il moto delle particelle è governato dai termini convettivi legati alle velocità q_x e q_y , mentre nel caso ora in esame non viene trascurato nessun termine dell'equazione.

Ci si aspetta dunque che l'età dell'acqua diminuisca poiché, grazie ai processi di diffusione, si avrà un miglior mescolamento di particelle.

Si considerano ora due punti in laguna presi arbitrariamente, come in figura 5.7. Il punto verde è situato in una zona più vicina alle bocche, in particolare quella di Chioggia, mentre il punto rosso è posto a ovest della città di Venezia.



Figura 5.7: Definizione dei punti

Si vuole ora confrontare l'andamento intermareale dell'età calcolata con e senza diffusione. In figura 5.8 l'età calcolata senza diffusione è rappresentata da una linea tratteggiata, mentre quella che considera la diffusione è rappresentata da una linea continua. In legenda è specificato a che punto della figura 5.7 si riferiscono le curve.

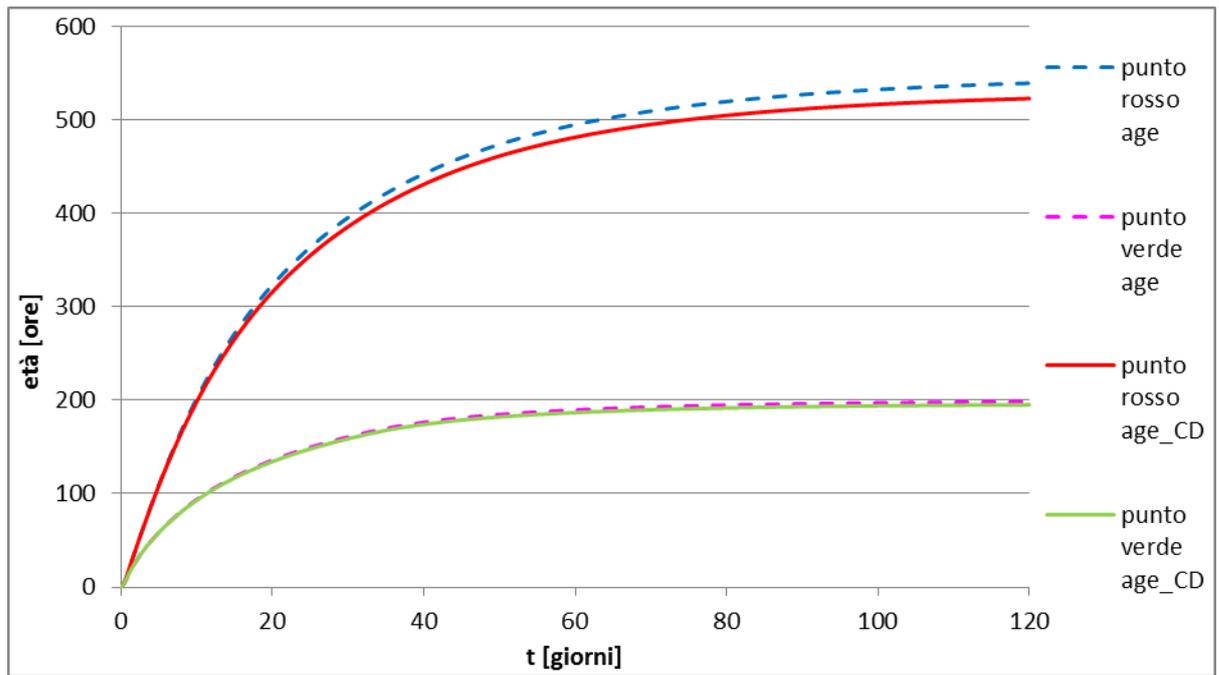


Figura 5.8: Confronto tra l'età calcolata con e senza diffusione

Come ci si aspettava, si osserva che la diffusione comporta un abbassamento dell'età, in quanto favorisce un mescolamento più efficiente tra le particelle.

L'entità di questo abbassamento non è molto importante, tuttavia si nota che da punto a punto può essere sensibilmente diversa. All'aumentare dell'età cresce anche lo scostamento tra i risultati ottenuti con i due diversi modelli. Ciò è dovuto al fatto che più ci si avvicina alle bocche, meno si sente l'effetto del termine diffusivo in quanto il mescolamento è influenzato più dal moto mareale che dalla diffusione in sé, al contrario il termine diffusivo diventa importante quanto più ci si allontana dalle bocche perché favorisce il mescolamento tra le particelle, questa volta non molto influenzate dal moto ondoso.

Infine si possono confrontare i file .bup relativi all'estrapolazione (figura 5.9) e al rapporto tra l'ultimo valore dell'età calcolato e il corrispondente valore dell'età estrapolata (figura 5.10) per osservare in tutto il dominio, dalle differenze cromatiche, in quali zone della laguna l'entità della differenza tra i due modelli sia più importante.

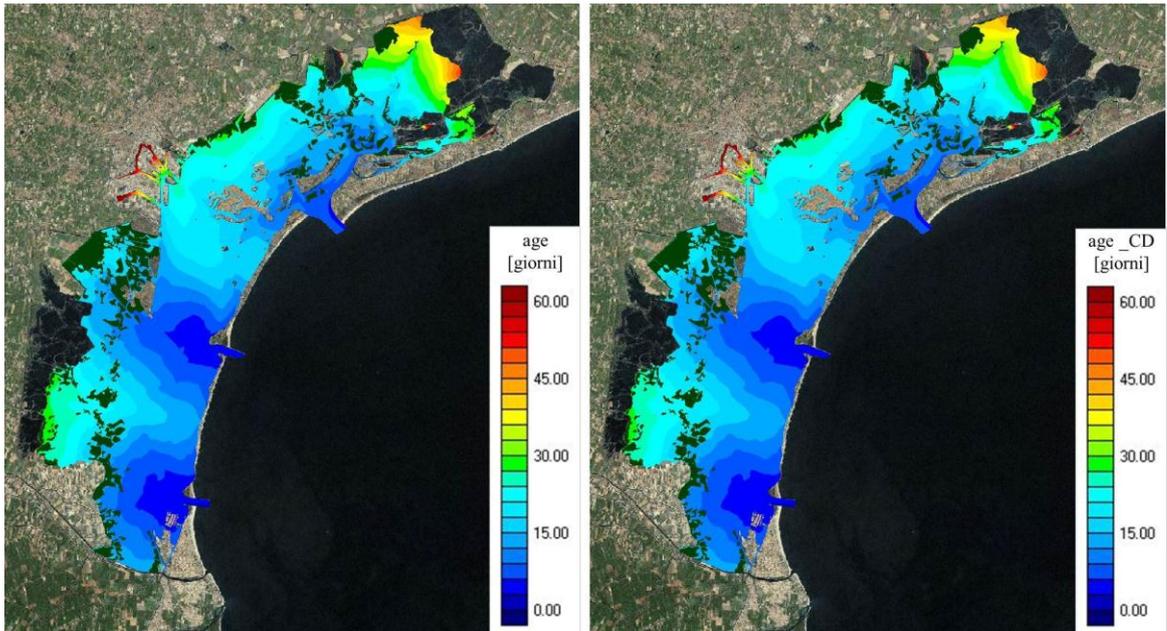


Figura 5.9: Confronto tra l'estrapolazione dell'età calcolata con e senza diffusione

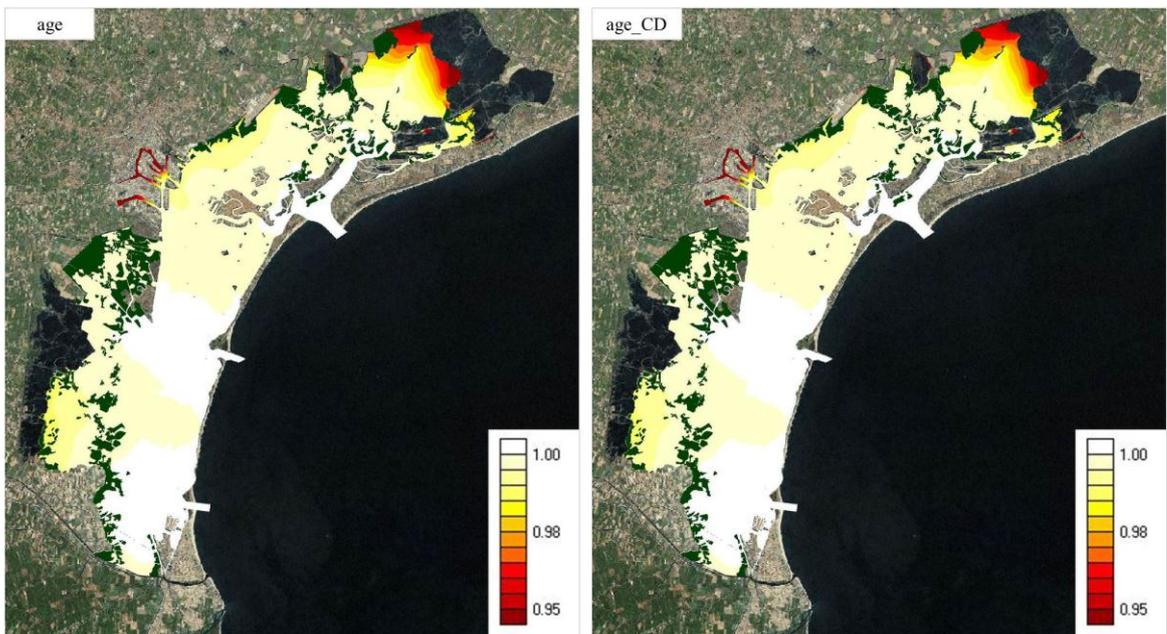


Figura 5.10: Confronto tra i risultati ottenuti dell'età calcolata con e senza diffusione

Particolari differenze cromatiche tra l'età calcolata con e senza diffusione non si notano, in alcune zone, in particolare quella a nord e quella posteriore, l'età calcolata con la diffusione è leggermente inferiore ma l'entità di questa differenza si può considerare trascurabile.

5.3 VALUTAZIONE DEL TEMPO DI RESIDENZA

Visti i risultati riguardanti l'età dell'acqua, si vogliono ora valutare quelli ottenuti per il tempo di residenza nella laguna di Venezia.

Si considerano gli stessi cinque punti trattati per l'età (figura 5.1) pertanto ci si aspettano gli stessi risultati, cioè che i punti più vicini alle bocche di porto, cioè i punti blu e azzurro, siano più influenzati dai processi di mescolamento e quindi il decadimento della curva esponenziale sia più veloce rispetto ai punti più lontani dalle bocche e dai canali interni, come quello rosso e quello rosa.

In figura 5.11 si riporta un esempio di output del modello relativamente a quindici giorni, ottenuto sovrapponendo tre simulazioni di cinque giorni.

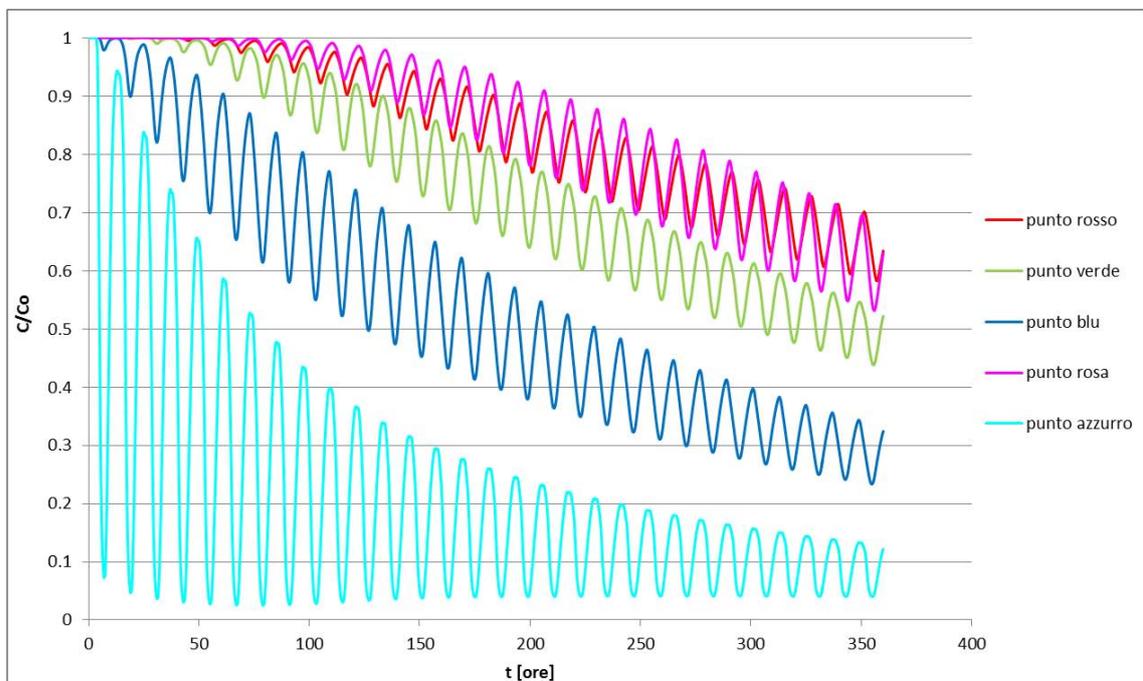


Figura 5.11: Andamento del rapporto C/C_0 nel tempo in cinque punti del dominio (360 ore)

Per $t = 0$ ore, cioè all'istante iniziale, tutte le curve partono dal valore 1 e quindi dalla condizione per cui la concentrazione ovunque nel dominio ha un valore fissato pari a C_0 .

Si osserva, come previsto, che le curve più alte sono quella verde, quella rossa e quella rosa, la curva blu presenta un decadimento più veloce, mentre l'oscillazione della curva azzurra si attesta ancora più velocemente su valori bassi del rapporto C/C_0 .

Si osserva inoltre, per ciascuna curva, l'andamento sinusoidale dovuto alla marea, la cui oscillazione è tuttavia molto diversa da zona a zona. Infatti, per i punti più lontani dalle bocche di

porto, dove c'è poco ricambio d'acqua e quindi poco mescolamento con particelle d'acqua di mare aventi concentrazione pari a zero e per le quali la concentrazione varia poco rispetto a quella iniziale, si mantiene un'oscillazione pressoché costante e un lento decadimento della curva. Per i punti più vicini alle bocche, invece, i quali fin da subito sono soggetti al mescolamento con l'acqua pulita del mare, si osserva nella curva un'oscillazione pronunciata all'inizio, poi, mano a mano che la concentrazione in questi punti scende perché l'acqua si è ormai omogeneizzata con quella di mare, allora anche l'oscillazione cala.

Per capire meglio come avviene il mescolamento e come questo influenzi notevolmente l'andamento delle curve appena analizzate, si possono considerare ancora i primi quindici giorni di simulazione e valutare una sequenza di immagini (figura 5.12).

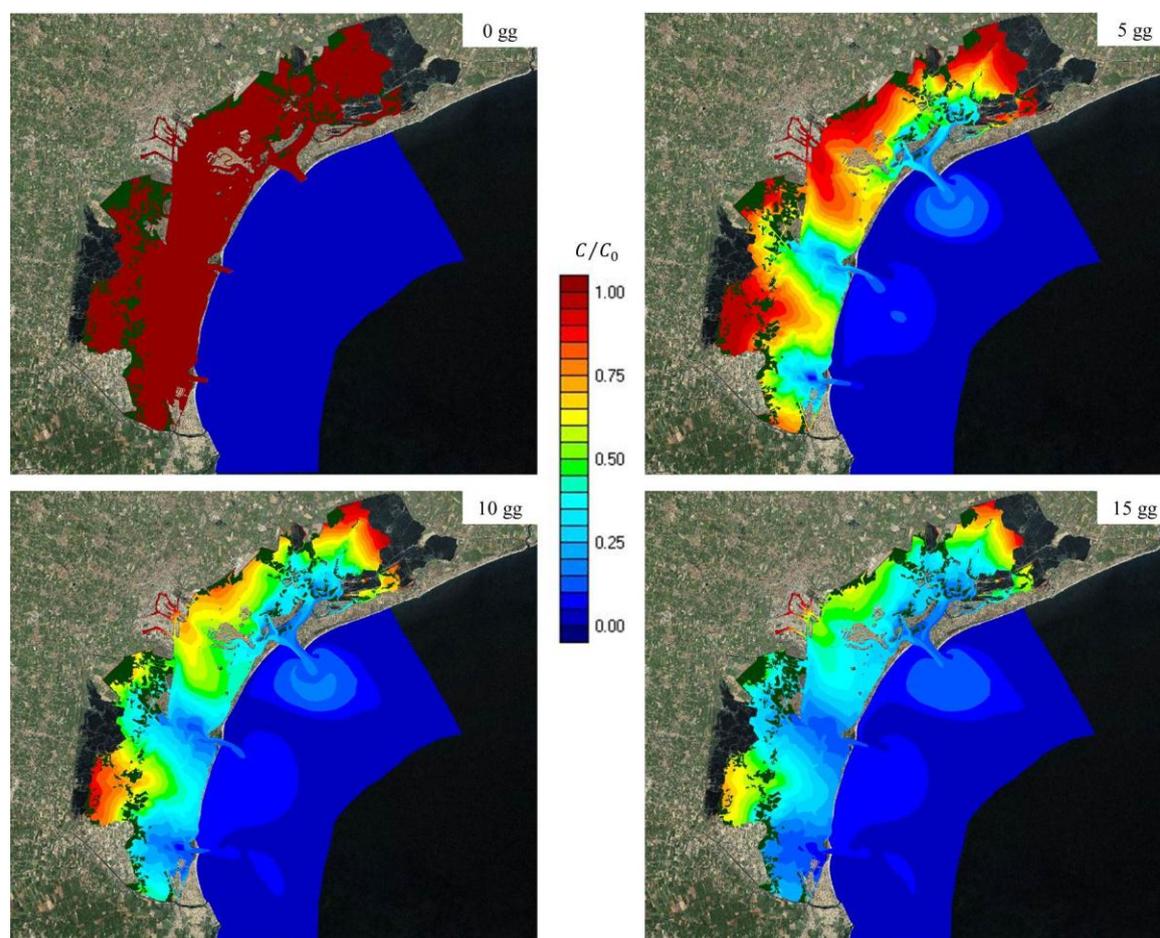


Figura 5.12: Il rapporto C/C_0 in una sequenza temporale

Si osserva innanzitutto la diversa condizione iniziale rispetto alle simulazioni dell'età, in cui si partiva in tutto il dominio con concentrazione pari a zero, mentre in questo caso si ha concentrazione unitaria in laguna, nulla nel tratto di mare. In secondo luogo si nota che il

mescolamento tra l'acqua del mare e della laguna avviene con molto ritardo nelle zone ai margini della laguna, soprattutto nella zona più a nord e nella zona posteriore, dove il colore vira verso il blu molto più lentamente. Ciò significa che in queste parti della laguna la concentrazione C è ancora molto vicina a quella iniziale C_0 .

Come si è fatto per l'analisi dell'età, anche in questo caso sarebbe più significativo ricavare un andamento intermareale dell'età, facendo la media sulla marea. Si rappresentano i risultati in figura 5.13, relativi ai punti considerati precedentemente (figura 5.1) per la complessiva durata delle simulazioni, pari a quattro mesi, cioè a centoventi giorni.

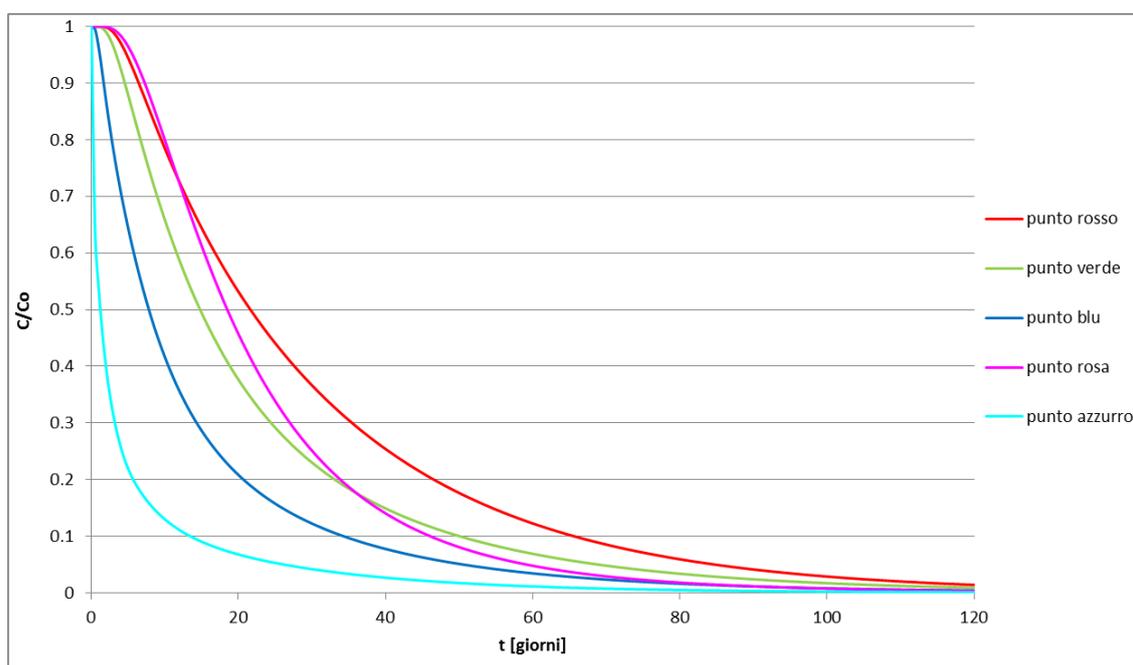


Figura 5.13: Andamento del rapporto C/C_0 nel tempo in cinque punti del dominio (120 giorni)

Come si è osservato nei quindici giorni, il decadimento esponenziale varia al variare dell'area considerata all'interno della laguna: più ci si allontana dalle bocche di porto, più il decadimento è rallentato, cioè la curva esponenziale si alza. Si osserva inoltre che le curve si incrociano in alcuni punti del grafico, ciò significa che in un particolare istante due punti del dominio hanno la stessa concentrazione.

Accanto a questo grafico, sarebbe interessante fornire una rappresentazione delle stesse curve in scala semi-logaritmica (figura 5.14). Sapendo che il rapporto C/C_0 è definito dalla relazione:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-t/T_e}$$

applicando il logaritmo si ottiene:

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -\frac{t}{T_e}$$

che ha l'andamento di una retta.

In particolare, quando $t = T_e$ si ha:

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -1$$

quindi in questo grafico si può leggere in ascissa il tempo di residenza relativo a ciascun punto.

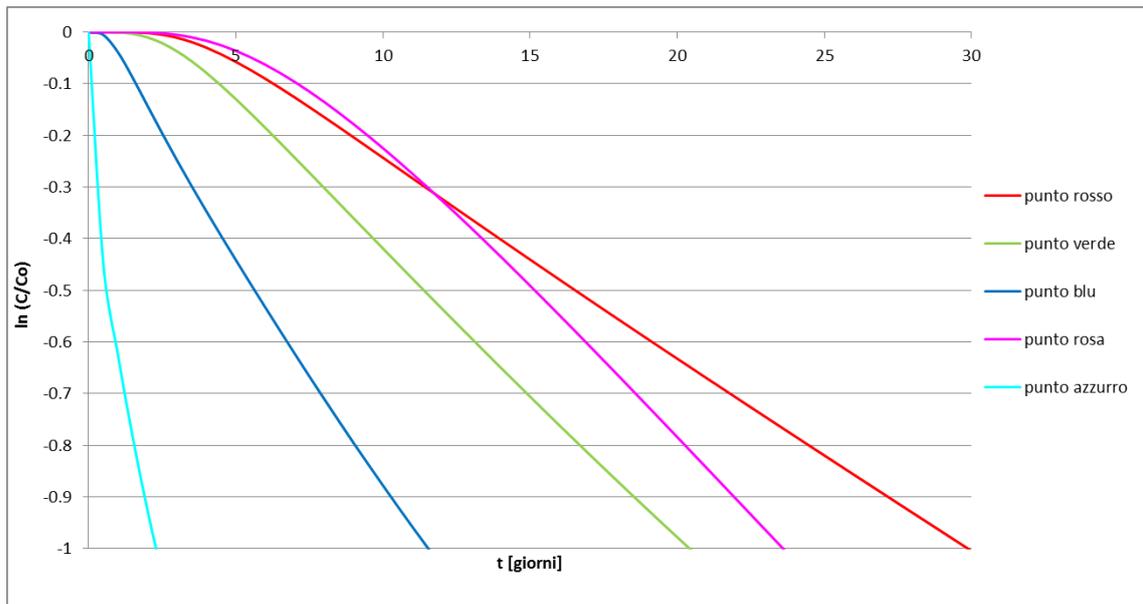


Figura 5.14: Andamento del rapporto C/C_0 nel tempo in scala semi-logaritmica

Applicando il logaritmo ai dati ottenuti relativi ai punti rappresentati in figura 5.1, si ottengono delle curve che hanno un andamento abbastanza rettilineo, pertanto si può dire che le assunzioni teoriche trovano buona conferma nelle applicazioni pratiche.

Inoltre, si trova conferma delle valutazioni fatte per il grafico in figura 5.13 relativamente al decadimento della concentrazione. Dall'inclinazione delle rette, che indica la velocità del decadimento, si nota che è effettivamente minore per i punti lontani dalle bocche e molto elevata per quelli in prossimità di queste. Infatti il tempo di residenza aumenta al diminuire dell'inclinazione della retta poiché il decadimento alla soglia $1/e$ è via via più lento. Comunque per i punti considerati il tempo di residenza, letto in ascissa, non supera i trenta giorni.

Si vuole infine calcolare il tempo di residenza utilizzando un programma che, come descritto nel paragrafo 5.1, 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 figura 5.15 si riporta l'immagine ottenuta con Incidenze del file .bup creato in questo modo, contenente i tempi di residenza della laguna di Venezia.

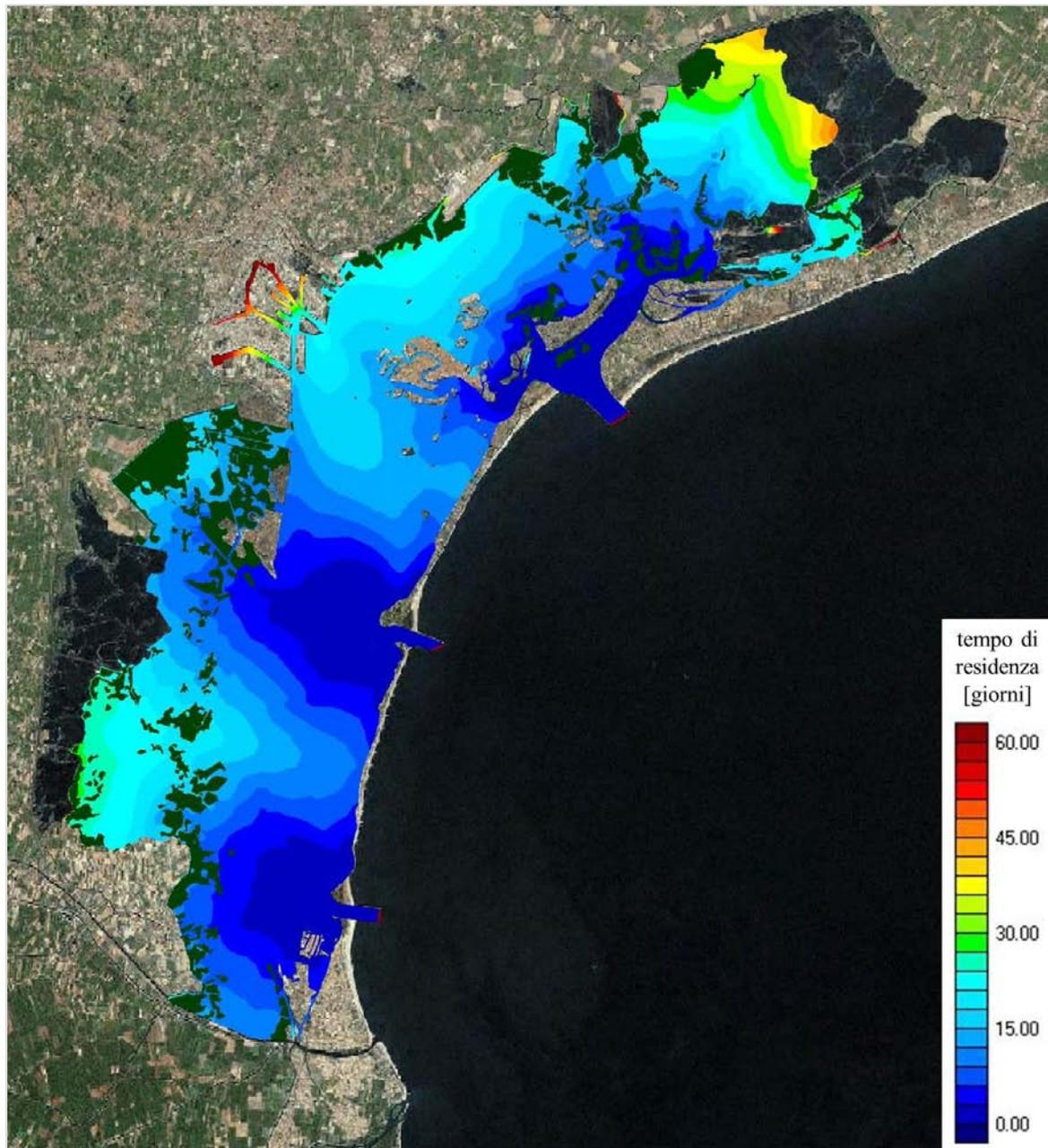


Figura 5.15: Il tempo di residenza nella laguna di Venezia

5.4 CONFRONTO TRA GLI INDICATORI

In questa parte conclusiva si vuole dimostrare, come si è visto nel capitolo 2, che l'età dell'acqua equivale al tempo di residenza in un bacino a marea. Avendo tutti i dati a disposizione, si possono ora fare tutti i confronti tra i tempi-scala calcolati nella laguna di Venezia con il modello idrodinamico.

A partire dai dati relativi all'estrapolazione dell'età dell'acqua e del tempo di residenza si utilizza un programma fornito dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova che rileva i risultati precedentemente calcolati nell'intero dominio. Si serve come file input dei due .bup relativi all'estrapolazione, oggetto di confronto, e fornisce come output un file testo contenente, in due colonne separate, i valori dei tempi-scala relativi a tutto il dominio di calcolo.

Il file così ottenuto si è poi importato in un foglio di calcolo, dove si sono potuti graficare i risultati. Riportando un tempo-scala in ascissa, l'altro in ordinata, quanto più tendono alla retta bisettrice tanto più sarà giustificata la loro uguaglianza.

In seguito si mostrano i grafici relativi al confronto tra:

- l'età dell'acqua calcolata con e senza diffusione,
- l'età dell'acqua calcolata senza diffusione e il tempo di residenza,
- l'età dell'acqua calcolata con la diffusione e il tempo di residenza.

5.4.1 Età dell'acqua calcolata con e senza diffusione

Vista la trascurabile differenza tra i risultati dei due modelli che, in un caso si considerano i termini diffusivi, nell'altro caso vengono trascurati, ci si aspetta che dal confronto i valori risultino ben allineati lungo la bisettrice.

In figura 5.16 è raffigurato il grafico avente in ascissa i valori dell'età calcolata con la diffusione, in ordinata quelli dell'età calcolata senza diffusione.

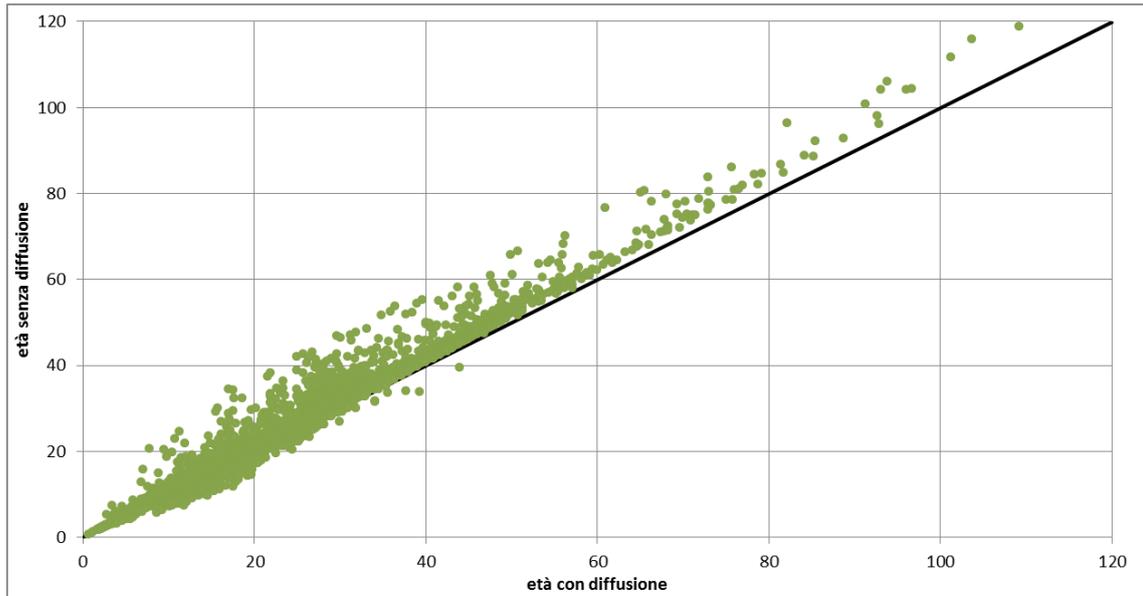


Figura 5.16: Età con e senza diffusione

Dal grafico si nota che i punti sono ben posizionati lungo la bisettrice. Il fatto che siano posti leggermente sopra la retta significa che l'età calcolata senza diffusione è di poco sovrastimata, come già si era visto nel paragrafo 5.2.1 per alcuni punti del dominio.

Si deve infine precisare che per ottenere questi risultati si sono dovuti escludere dal grafico alcuni punti (circa 300) appartenenti a zone per le quali l'età calcolata senza diffusione era molto più grande di quella calcolata con diffusione. Si è verificato che questi punti appartengono effettivamente a zone di confine con la terraferma oppure a zone barenali, in cui la diffusione assume una certa importanza.

5.4.3 Età dell'acqua calcolata senza diffusione e tempo di residenza

Dal confronto tra l'età e il tempo di residenza si vorrebbe vedere una buona corrispondenza dei dati, così da trovare conferma delle deduzioni teoriche fatte nel capitolo 2.

In figura 5.17 è raffigurato il grafico avente in ascissa i valori dell'età calcolata senza diffusione, in ordinata quelli del tempo di residenza.

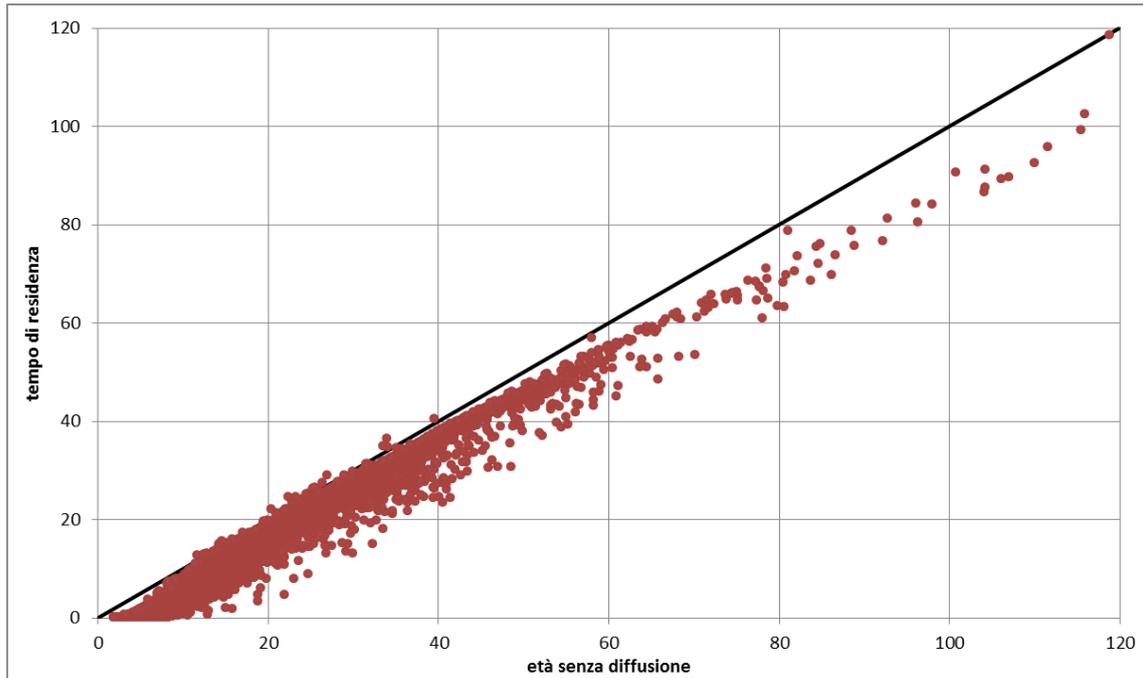


Figura 5.17: Età senza diffusione e tempo di residenza

Anche in questo caso si osserva un andamento dei punti abbastanza allineato alla bisettrice. Come per il caso precedente, il fatto che siano posizionati sotto la retta significa che l'età risulta leggermente maggiore rispetto al tempo di residenza.

In questo caso si sono esclusi i dati (365 valori) aventi tempo di residenza imposto pari a 999 giorni, poiché significa che dopo centoventi giorni di simulazione il decadimento della loro concentrazione non ha raggiunto la soglia $1/e$.

Si sono inoltre esclusi dal grafico quei valori dell'età (circa 300) che, come il caso precedente, sono appartenenti a zone per le quali l'età calcolata senza diffusione risulta molto più grande del tempo di residenza, che invece tiene conto dei processi diffusivi.

5.4.2 Età dell'acqua calcolata con la diffusione e tempo di residenza

In questo caso sia l'età che il tempo di residenza tengono conto dei processi diffusivi, pertanto ci si aspettano risultati decisamente simili.

In figura 5.18 è raffigurato il grafico avente in ascissa i valori dell'età calcolata con la diffusione, in ordinata quelli del tempo di residenza.

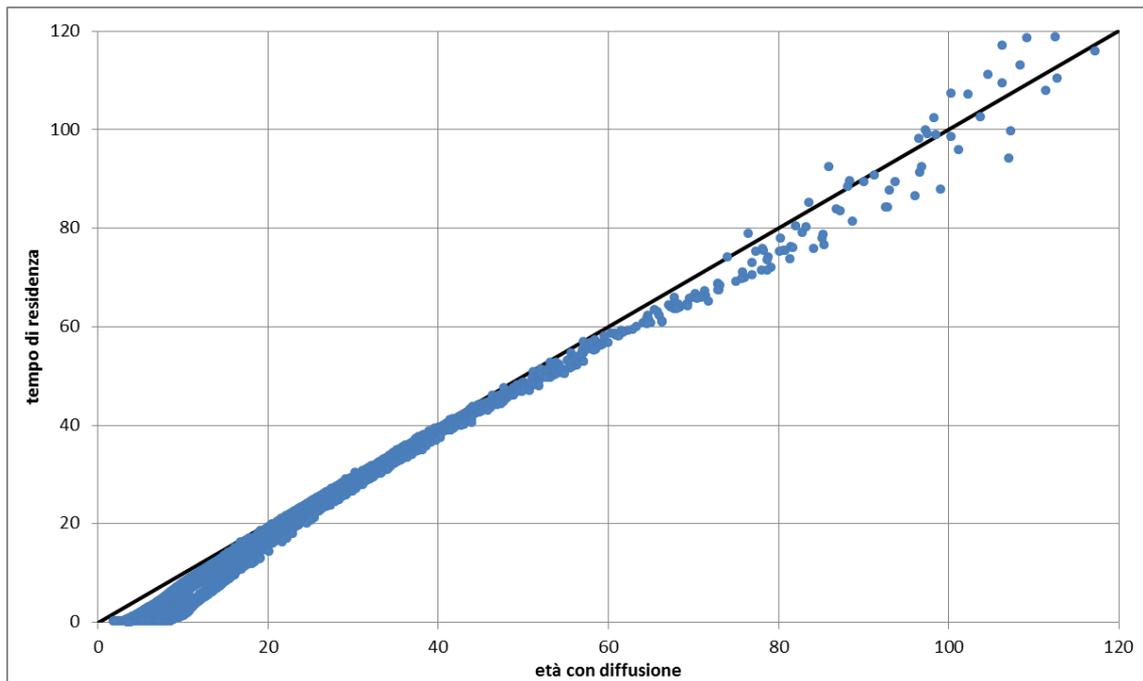


Figura 5.18: Età con diffusione e tempo di residenza

In questo caso, come ci si aspettava, i risultati sono molto ben allineati lungo la bisettrice. Nella laguna di Venezia è dunque giustificata l'equivalenza tra i due tempi-scala.

Come per il caso precedente, si sono esclusi i dati (365 valori) aventi tempo di residenza imposto pari a 999 giorni, poiché significa che dopo centoventi giorni il decadimento della loro concentrazione non ha raggiunto la soglia $1/e$.

Capitolo 6

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro si sono presi in considerazione due tempi-scala, l'età dell'acqua e il tempo di residenza, e si è visto che possono sostituirsi o affiancarsi a più complicati modelli di misura della qualità delle acque, di difficile calibrazione. Dopo averli descritti da un punto di vista teorico, si sono calcolati in uno studio applicato alla laguna di Venezia.

Come si è cercato di evidenziare nel capitolo 3, la laguna di Venezia è un ambiente delicato in continuo mutamento, ma è altrettanto un ambiente fondamentale per la vita ed è quindi necessario venga salvaguardato. Per questo motivo, è fondamentale avere a disposizione strumenti efficienti ed efficaci per una costante analisi della qualità delle acque. Il vantaggio dei tempi caratteristici, come si è detto, è appunto la semplicità di calcolo, oltre che la velocità con cui vengono calcolati, e sono requisiti necessari per formulare giudizi fondati, in un tempo relativamente breve.

L'obiettivo principale del presente lavoro è stato quello di approfondire la conoscenza di questi tempi-scala, in particolare dimostrare l'equivalenza tra l'età dell'acqua e il tempo di residenza in un bacino a marea e, grazie a questo studio applicato, si è potuto trovare riscontro pratico delle ipotesi fatte.

L'analisi si è eseguita con 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, per l'età, un veloce ringiovanire di particelle, mentre, per il tempo di residenza, un veloce decadimento della concentrazione. Alla fine delle simulazioni effettuate si sono ricavati i risultati per ogni punto della laguna mediante estrapolazione e si è subito notata la differenza tra i risultati ottenuti nelle diverse zone della laguna. Sia per l'età che per il tempo di residenza si è

trovato che più ci si avvicina alle bocche più si ha rinnovo d'acqua, viceversa, lontano dalle bocche, dove il mescolamento tra le particelle è ridotto, i tempi-scala assumono valori sensibilmente più elevati.

Infine, dal confronto puntuale tra l' "e-folding residence time" e l'età dell'acqua calcolati nella laguna di Venezia, si può affermare che, non solo le indagini modellistiche hanno confermato i risultati attesi, ma permettono di sfruttare questa uguaglianza calcolando il tempo di residenza in laguna anziché l'età, molto più onerosa nella stima. Infatti, mentre il tempo di residenza è subito definito, una volta che la concentrazione raggiunge la soglia $1/e$, l'età dell'acqua si può determinare dopo un tempo tendente ad infinito, per questo si è fatta un'estrapolazione.

Si può quindi affermare che l'analisi dei tempi-scala con i modelli bidimensionali ha portato a risultati non solo affidabili, ma soprattutto utili per applicazioni future riguardanti l'analisi delle acque e, sulla base di conoscenze specifiche, per proporre interventi di miglioramento della salute di bacini naturali come la laguna di Venezia.

APPENDICE 1: terminologia dei tempi-scala

In letteratura si utilizzano svariati termini, come tempi-scala, per quantificare gli effetti dei processi di trasporto fisico nei bacini. Sono molto simili anche se non sono esattamente uguali, perché ciascuno ha la propria definizione e le proprie assunzioni. Per questo accade che lo stesso termine sia usato con definizioni e assunzioni diverse oppure che la stessa definizione sia data a termini diversi.

Si vogliono pertanto riassumere i termini più comunemente usati, le definizioni loro attribuite e i modi utilizzati per calcolarli.

Nelle formule di seguito riportate si utilizzano i seguenti parametri:

- b = “return flow factor” o fattore di rientro,
- f = “fraction of fresh water” o frazione d’acqua dolce entrante nel caso di foce fluviale,
- V = volume in bassa marea dell’intero bacino o di una sua parte,
- V_f = volume d’acqua entrante accumulato in tutto o in una parte di bacino nel caso di foce fluviale,
- R = portata entrante nel caso di flusso fluviale,
- P = “tidal prism”, cioè il volume entrante/uscente a seconda del ciclo di marea,
- Q = tasso o volume d’acqua entrante durante la fase di flusso,
- T = periodo dell’onda di marea.

a. Flushing time

1. È il tempo richiesto per rimpiazzare l’acqua presente nell’intero o in una parte di bacino soggetta a corrente fluviale (nel caso vi sia una foce di un fiume) oppure soggetta al flusso e al riflusso della marea (nel caso non vi sia una foce di un fiume) [Bowden (1967), Dyer (1973), Officer (1976), Fischer et al. (1979)]:

$$T_f = \frac{V_f}{R}$$

2. Il volume d'acqua marina e fluviale (nel caso vi sia la foce di un fiume) introdotto in un bacino a marea nella fase di flusso è definito "tidal prism" e lo stesso volume viene rimosso nella fase di riflusso, pertanto il "flushing time" è definito da [Bowden (1967), Dyer (1973)]:

$$T_f = \frac{(V + P)T}{P}$$

b. Residence time

1. È il tempo richiesto perché tutta la massa di un tracciante conservativo presente nell'intero o in una parte di bacino sia ridotta al fattore 1/e (è una modifica della definizione a.2.):

$$T_r = \frac{(V+P/2)T}{(1-b)P+RT} \quad [\text{Sanford et al. (1992)}]$$

$$T_r = \frac{(V+P)T}{(1-b)P+RT/2} \quad [\text{Luketina (1998)}]$$

2. È il tempo richiesto ad una particella per spostarsi da una posizione all'interno ai confini di un dominio [Prandtl (1984)], perciò dipendente dalla posizione in cui è stata rilasciata, mentre per de Kreeke (1983) dipende anche dalla fase di marea in cui è stata rilasciata.
3. È il tempo medio che tutta l'acqua contenuta nell'intero o in una porzione di bacino rimane nello stesso, definita dall'espressione [Wang et al.(2004)]:

$$T_r = \frac{1}{M(0)} \int_0^{\infty} t \left(-\frac{dM(t)}{dt} \right) dt$$

c. Renewal time

1. È il tempo richiesto per rimpiazzare una specifica frazione d'acqua in un bacino con acqua proveniente dal flusso fluviale (nel caso vi sia una foce di un fiume) o marino [Pritchard (1960)].

Ad esempio il "renewal time" del 50% è pari a:

$$T_{1/2} = 0,693 \frac{V}{R + Q}$$

Lo stesso autore ha definito anche il "renewal time" medio, volendo far riferimento ad un tempo di residenza:

$$T_m = \frac{V}{R + Q}$$

d. Mean detention time

1. È il tempo medio che una particella di tracciante permane all'interno di un bacino (è chiamato anche "flushing time" da Fisher et al. (1979), come si è definito al punto a.1.)

e. Turn-over time

1. Simile al punto a.1. [Bolin and Rodhe (1973)].
2. Simile al punto b.1. [Prandtl (1984)].

f. Exchange time

1. Uguale al punto b.1. [Gillibrand (2001)].

g. Transit time

1. È il tempo che intercorre tra il momento in cui una particella entra ed esce da un bacino [Bolin and Rodhe (1973)].

h. Age

1. È il tempo trascorso da quando una particella d'acqua entra in un bacino [Bolin and Rodhe (1973)].

APPENDICE 2: e-folding residence time

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 di un tracciante posto in tale bacino all'inizio della fase di riflusso:

$$c(t) = \frac{M(t)}{V_0 + \Delta V/2} \quad (1)$$

dove $M(t)$ è la massa del tracciante, V_0 è il volume d'acqua nel bacino e ΔV è il volume d'acqua entrante o uscente dal bacino durante un ciclo di marea, chiamato "tidal prism".

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

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

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 molto più piccola della concentrazione media $c(t)$ e la variabile $\xi(t) = c_e(t)/c(t)$ può essere considerata un coefficiente di mescolamento o "mixing efficiency factor". Si può quindi approssimare la (2) come:

$$\Delta M_e \cong \xi c(t) \Delta V \quad (3)$$

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

$$c(t + T/2) = \frac{M(t) - \Delta M_e}{V_0 - \Delta V/2} \quad (4)$$

da cui sostituendo la (1) e la (3) si ottiene:

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

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

$$\Delta M_f = \int_{T/2}^T c_r(\tau) Q_f(\tau) d\tau \quad (5)$$

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 (5) come:

$$\Delta M_f \cong c_r \Delta V$$

e c_r come una frazione ζ , chiamata fattore di ritorno o “return flow factor”, della concentrazione uscente, cioè:

$$c_r \cong \zeta \frac{\Delta M_e}{\Delta V} = \zeta \xi c(t)$$

quindi risulta:

$$\Delta M_f \cong \zeta \xi c(t) \Delta V \quad (6)$$

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

$$c(t + T) = \frac{M(t) - \Delta M_e + \Delta M_f}{V_0 + \Delta V/2} \quad (11)$$

da cui sostituendo la (1), la (3) e la (6) si ottiene:

$$c(t + T) = \frac{c(t)(V_0 + \Delta V/2) - \xi c(t)\Delta V + \zeta \xi c(t)\Delta V}{V_0 + \Delta V/2}$$

e raccogliendo $c(t)$:

$$c(t + T) = c(t) \frac{V_0 + \Delta V/2 - \xi\Delta V + \zeta \xi \Delta V}{V_0 + \Delta V/2}$$

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

$$c(t + T) - c(t) = c(t) \frac{V_0 + \Delta V/2 - \xi\Delta V + \zeta \xi \Delta V - V_0 - \Delta V/2}{V_0 + \Delta V/2}$$

e dividendo per T si ottiene:

$$\frac{c(t + T) - c(t)}{T} = c(t) \frac{-\xi\Delta V + \zeta \xi \Delta V}{T(V_0 + \Delta V/2)}$$

A questo punto si può raccogliere ΔV al numeratore del secondo membro e applicare il limite per T tendente a zero. Visto che $\Delta V/T$ è costante, si ottiene:

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

$$\frac{dc(t)}{dt} = -c(t)\xi \frac{1-\zeta}{V_0} \left(\frac{\Delta V}{T}\right)$$

Integrando l'equazione si ha:

$$\ln c(t) = -\xi \frac{1-\zeta}{V_0} \left(\frac{\Delta V}{T}\right) t + \text{const}$$

dove per $t=0$ s la concentrazione $c(t=0 \text{ s}) = c_0$ quindi la costante di integrazione vale:

$$\ln c_0 = \text{const}$$

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

$$\frac{c(t)}{c_0} = \exp\left\{-\xi \frac{1-\zeta}{V_0} \left(\frac{\Delta V}{T}\right) t\right\}$$

in cui si fa riferimento ad un particolare tempo di residenza T_e chiamato “e-folding residence time” e avente l'espressione:

$$T_e = T \frac{V_0/\Delta V}{\xi(1-\zeta)}$$

Entrambi i fattori ξ e ζ influenzano l' “e-folding residence time”: dall'espressione ricavata si vede che all'aumentare di ξ il tempo T_e diminuisce, mentre all'aumentare di ζ anche il tempo T_e aumenta. Il termine ξ è importante altrimenti tutto il processo risulta dipendente solo dal rapporto tra il volume del bacino V_0 e il “tidal prism” ΔV e dal “return flow factor” ζ . Ad esempio, in presenza di vento sia il “tidal prism” che il “return flow factor” sono presumibilmente poco influenzati, mentre il mescolamento può essere decisamente più intenso e può essere descritto dal termine di efficienza di mescolamento, cioè da ξ . Anche la realizzazione di canali e barene può avere un'influenza modesta sul “tidal prism” e sul “return flow factor”, ma incrementare sensibilmente l'efficienza di mescolamento, che comporta una riduzione del tempo di residenza.

È inoltre possibile valutare mediante simulazioni numeriche sia l'efficienza del mescolamento ξ che il “return flow factor” ζ . Ad ogni passo di calcolo, si calcola il volume di tracciante nel bacino V_c , il volume del tracciante fuori dal bacino W_c e il volume d'acqua nel bacino V_a . Alla fine della simulazione si può quindi valutare, ad ogni ciclo di marea, la concentrazione $c(t)$ all'inizio della fase di riflusso, il volume di tracciante e il volume d'acqua fuoriusciti durante tale fase e calcolare quindi l'efficienza di mescolamento dall'espressione $\Delta M_e \cong \xi c(t) \Delta V$. Si calcola

poi il volume di tracciante che rientra nel bacino e il volume d'acqua rientrante durante la fase di flusso, quindi si può calcolare il "return flow factor" dall'espressione $\Delta M_f \cong \zeta \xi c(t) \Delta V$.

Bibliografia

- [1] Bolin, B., Rodhe, H., 1973. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. *Tellus* 25, 58e62.
- [2] 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.
- [3] van de Kreeke, J., 1983. Residence time: application to small boat basins. *ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 109 (4), 416-428.
- [4] Takeoka, H., 1984 a. Exchange and transport time scales in a coastal sea. *Continental Shelf Res.* 3 (4), 327-341. Takeoka, H., 1984 b. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. *Continental Shelf Res.* 3 (3), 311–326.
- [5] Zimmerman, J.T.F., 1988. Estuarine residence times. In: Kjerfve, B. (Ed.), *Hydrodynamics of Estuaries 1, Estuarine Physics*. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, pp. 76e84.
- [6] Thiele, G., and J. L. Sarmiento, 1990. Tracer dating and ocean ventilation. *J. Geophys. Res.*, 95, 9377–9391.
- [7] D’Alpaos, L., Defina, A., 1995. Modellazione matematica del comportamento idrodinamico di zone di barena solcate da una rete di canali minori (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.

- [8] England, M. H., 1995. The age of water and ventilation timescales in a global ocean model. *J. Phys. Oceanogr.*, 25, 2756–2777.
- [9] Luketina, D., 1998. Simple tidal prism model revisited. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 46, 77-84.
- [10] Defina, A., 2000a. Two dimensional shallow flow equations for partially dry areas. *Water Resources Research* 36 (11), 3251–3264. Defina, A., 2000b. Alcune considerazioni sulla modellazione matematica di correnti bidimensionali caratterizzate da piccoli tiranti (A note on the mathematical modeling of very shallow flows). *Atti del XXVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche I*, 255–262.
- [11] Dettmann, E., 2001. Effect of water residence time on annual export and denitrification of nutrient in estuaries: a model analysis. *Estuaries* 24 (4), 481-490.
- [12] Monsen, N.E., Cloern, J.E., Lucas, L.V., 2002. A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales. *Limnology and Oceanography* 47 (5), 1545-1553.
- [13] Wang, C.F., Hsu, M.H., Kuo, A.Y., 2004. Residence time of the Danshuei River Estuary, Taiwan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 60, 381-393.
- [14] Cucco, A., Umgiesser, G., 2006. Modeling the Venice Lagoon residence time. *Ecological Modelling* 193, 34-51.
- [15] Shen, J., Wang, H.V., 2007. Determining the age of water and long-term transport timescale of the Chesapeake Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 74(4), 585–598.
- [16] de Brauwere, Anouk, Benjamin de Brye, Sébastien Blaise, Eric Deleersnijder, 2011. Residence time, exposure time and connectivity in the Scheldt Estuary. *Journal of Marine Systems* 84 (2011) 85–95.