



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Dipartimento ICEA

TESI DI LAUREA

*DISTRIBUZIONE SPAZIALE DEL COEFFICIENTE DI
DISPERSIONE INTERMAREALE NELLA LAGUNA DI VENEZIA
DEL 1901 E CONFRONTO CON LA SITUAZIONE PRESENTE E
FUTURA*

Relatore: Prof. Andrea Defina

Laureanda: Giulia Larese Filon

ANNO ACCADEMICO 2012-2013

Indice

1	<i>INTRODUZIONE</i>	5
2	<i>INQUADRAMENTO GEOGRAFICO-AMBIENTALE</i>	9
2.1	NASCITA E SCOMPARSA DELLE LAGUNE	9
2.2	LA LAGUNA DI VENEZIA	11
2.2.1	Morfologia della laguna	11
2.2.2	Flora e fauna della laguna	14
2.2.3	Il paesaggio lagunare	17
2.2.4	Attività caratteristiche della laguna	18
3	<i>EVOLUZIONE MORFOLOGICA DELLA LAGUNA</i>	19
3.1	PREMESSA	19
3.2	LETTURA DI MAPPE STORICHE E CARTE IDROGRAFICHE	21
3.3	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	29
4	<i>PROBLEMA DELL'INQUINAMENTO IN LAGUNA</i>	35
5	<i>BASI TEORICHE PER L'APPLICAZIONE DEI MODELLI</i>	39
5.1	INTRODUZIONE	39
5.1.1	Metodi di indagine: Euleriano e Lagrangiano	39
5.1.1.1	Approcci euleriano e lagrangiano nei modelli di dispersione intermareale	40
5.2	IL FENOMENO DELLA DISPERSIONE DAL PUNTO DI VISTA LAGRANGIANO	41
5.2.1	Il "random walk"	41
5.2.2	Il moto Browniano	42
5.2.3	Il processo di dispersione	44
5.3	IL MODELLO DISPERSIVO INTERMAREALE SECONDO L'APPROCCIO LAGRANGIANO	46
5.3.1	Analisi delle principali caratteristiche cinematiche: le velocità residue	47
5.3.2	Analisi delle principali caratteristiche cinematiche: la dispersione	48
5.3.2.1	Il coefficiente di dispersione intermareale	48

6	<i>IL MODELLO IDRODINAMICO</i>	51
6.1	IL DOMINIO DI CALCOLO (file .geo)	52
6.2	CONDIZIONI AL CONTORNO E ISTRUZIONI DI CALCOLO (file .sim)	57
6.3	RISULTATI (file .out)	60
7	<i>APPLICAZIONE DEL MODELLO LAGRANGIANO</i>	69
7.1	DEFINIZIONE DEI PUNTI ANALIZZATI	70
7.2	GESTIONE DELL'IDRODINAMICA (file .out)	71
7.3	CONDIZIONI AL CONTORNO E ISTRUZIONI DI CALCOLO (file .SIM)	73
7.4	LETTURA DEI RISULTATI (file .trk)	75
8	<i>IL COEFFICIENTE DI DISPERSIONE INTERMAREALE E LE VELOCITÀ RESIDUE</i>	81
8.1	RAPPRESENTAZIONE DEL COEFFICIENTE DI DISPERSIONE INTERMAREALE	81
8.2	COEFFICIENTE DI DISPERSIONE INTERMAREALE MEDIO	86
8.3	VELOCITÀ RESIDUE	100
9	<i>SITUAZIONE ATTUALE E FUTURA DELLA LAGUNA DI VENEZIA</i>	105
9.1	IL COMPORTAMENTO DELLA LAGUNA NEGLI ANNI 2000	105
9.2	PREVISIONI FUTURE PER LA LAGUNA	113
9.3	EVOLUZIONE DELLA LAGUNA DI VENEZIA CON RIFERIMENTO AI PROCESSI DISPERSIVI	118
10	<i>CONCLUSIONI</i>	123
	BIBLIOGRAFIA	125

Capitolo 1

INTRODUZIONE

Con il presente lavoro si intende indagare innanzitutto le caratteristiche idrauliche proprie della laguna di Venezia nei primi anni del 1900 in relazione alla sua capacità di creare ricambio idrico sotto l'azione periodica di un'onda di marea. In un secondo momento si vuole compiere un confronto tra i risultati ottenuti con questo studio e quelli ricavati dalla stessa analisi effettuata sulla laguna nei primi anni 2000. Infine si illustra brevemente la situazione futura della laguna evidenziando alcuni risultati ottenuti da un modello concettuale che descrive a lungo termine l'evoluzione del bacino in erosione, sviluppato internamente al dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA) dell'Università di Padova.

L'obiettivo è quindi quello di fornire gli strumenti fisico-analitici che permettano la visualizzazione dell'entità del ricircolo delle acque nelle varie zone del bacino del 1901 e, di conseguenza, sullo stato di salute di cui esso godeva. Procedendo in questo modo si potrà comprendere il comportamento della laguna di Venezia agli inizi del secolo passato e confrontarlo con la situazione presente pochi anni fa (2003) e con quella prevista per il futuro (2050).

Nella prima parte della trattazione è stato inserito un breve inquadramento geografico e storico dell'area oggetto di studio. Ci si è soffermati, nel secondo capitolo, sulla descrizione dei principali elementi costituenti il bacino e perciò sul caratteristico paesaggio lagunare, la cui sopravvivenza è in serio pericolo. Nel terzo, invece, si è voluto dar spazio alla sua evoluzione morfologica esponendo i cambiamenti della laguna di Venezia negli anni, attraverso la lettura di due mappe storiche e alcune carte idrografiche.

Si è scelto di procedere in questo modo perchè la conoscenza dell'attuale situazione e delle numerose e successive trasformazioni del bacino, avvenute in seguito agli interventi dell'uomo, consente una migliore comprensione dei risultati ottenuti dallo studio. Infatti la qualità delle acque dipende fortemente dalle caratteristiche morfologiche proprie dei bacini poco profondi ed inoltre, la diffusione di un inquinante in essi è comandata dalla combinazione di molti fattori, tra i quali le correnti generate dalla marea, quelle generate dai venti e gli afflussi fluviali. Quindi l'elevata variabilità spaziale della laguna influenza fortemente il trasporto e la diffusione dei soluti nel sistema.

Questa prima sezione termina con il quarto capitolo, nel quale si pone l'attenzione sul problema dell'inquinamento nella laguna di Venezia elencando le sue molteplici cause. Si sottolinea l'importanza della conoscenza della situazione esistente attraverso l'utilizzo di parametri idrodinamici (il coefficiente di dispersione intermareale) che possono fornire lo stato di salute del bacino, cioè la capacità di rinnovo delle proprie acque, in modo da poter intervenire nelle zone di maggiore sofferenza, se necessario.

Il quinto capitolo dà inizio alla seconda parte della trattazione dedicata alla spiegazione del vero e proprio studio compiuto sulla laguna di Venezia. In questo capitolo sono stati inseriti dei cenni sulle basi teoriche e matematiche su cui si fondano i modelli utilizzati, mentre nei successivi (sesto, settimo e ottavo) questi modelli, sviluppati dal dipartimento ICEA dell'Università di Padova, sono stati spiegati dettagliatamente insieme ai relativi risultati.

Il problema della stima dell'efficacia del ricambio idrico è stato affrontato definendo per ogni punto della laguna un coefficiente di dispersione intermareale, cioè un parametro statistico che fisicamente dà un'idea dell'entità della diffusione spaziale di una concentrazione di soluto (comune e conservativo), inizialmente puntiforme, in seguito all'azione idrodinamica di un'onda di marea in un intervallo temporale, pari ad un periodo. A valori elevati di tali coefficienti corrisponde una maggiore dispersione del tracciante e di conseguenza una miglior qualità dell'acqua rispetto a quella presente nelle aree caratterizzate da valori del coefficiente più bassi. Si valuta perciò la capacità delle correnti, che si sviluppano nel bacino, di "strappare" le particelle del tracciante da un'assegnata posizione iniziale e disperderle nell'ambiente (fluido) circostante.

L'analisi si articola in fasi di studio ben distinte che comprendono diversi tipi di simulazioni. La prima operazione prevede la definizione del modello fisico, il quale costituirà il punto di partenza per tutti i passaggi successivi: si costruisce quindi un reticolo di maglie e nodi che riproduce l'intero bacino al fine di soddisfare le esigenze del modello agli elementi finiti utilizzato per simulare l'idrodinamica. Al reticolo, in un secondo momento, si assegnano le quote e tutti i parametri necessari alla completa descrizione delle caratteristiche fisiche, geometriche e idrauliche del dominio.

A questo punto si conduce la simulazione idrodinamica (tramite il modello *Idrodinamico*) con l'obiettivo di ricreare nel bacino, attraverso l'applicazione delle opportune condizioni al contorno, gli effetti idraulici causati dal passaggio periodico di un'onda di marea con caratteristiche significative per l'area di studio presa in esame. Questa simulazione è di fondamentale importanza in quanto la conoscenza puntuale e ad ogni istante dei parametri idraulici che animano le acque sarà alla base di tutte le successive simulazioni.

Si procede, poi, con l'indagine sulla dispersione studiando il comportamento di masse di particelle (macchie) concentrate in un certo numero di punti del dominio, attraverso simulazioni condotte in diverse condizioni idrauliche. Per la precisione si effettuano quattro simulazioni in un ciclo di marea (12 ore), considerando quattro diversi istanti di immissione, al fine di studiare anche la dipendenza del coefficiente di dispersione dalla fase mareale in cui vengono rilasciate le particelle. Solo in un secondo momento si calcola il coefficiente di dispersione medio, che produce una rappresentazione chiara ed efficace della capacità di ricambio idrico e permette di esprimersi in relazione allo stato di salute delle varie zone della laguna.

L'iter esecutivo per l'analisi della dispersione è il seguente: innanzitutto si scelgono, in modo intelligente e non del tutto arbitrario, i punti di interesse sui quali posizionare il tracciante estraendo le corrispondenti coordinate. Successivamente si passa all'esecuzione delle simulazioni, utilizzando il modello *Lagrangiano* che, a partire dall'idrodinamica già calcolata, studia il movimento delle particelle secondo un approccio lagrangiano, ricostruendone i percorsi e il processo diffusivo. Infine, i risultati così ottenuti costituiscono l'input per un semplice software che si occupa dell'elaborazione statistica restituendo il coefficiente di dispersione intermareale già citato.

I risultati ricavati sono stati commentati di volta in volta e rielaborati in vesti grafiche diverse a seconda del grado di avanzamento dell'analisi e della necessità di evidenziare gli aspetti qualitativi o quantitativi della stessa, allo scopo di ottenere una rappresentazione sintetica e di facile lettura.

La trattazione si chiude con il nono capitolo che descrive la situazione attuale e futura della laguna di Venezia, attraverso l'analisi di alcune rappresentazioni grafiche ricavate dagli studi recentemente effettuati da altre due laureande. Con un breve confronto vengono evidenziate e commentate le diversità riscontrate tra il comportamento del bacino nei primi anni del 1900 e del 2000. Inoltre si inserisce un'ipotetica configurazione futura della laguna del 2050 che fornisce un'interessante spunto di riflessione in merito al destino di questo particolare e unico territorio.

Capitolo 2

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO-AMBIENTALE

2.1 NASCITA E SCOMPARSA DELLE LAGUNE

Le lagune sono aree costiere costituite da specchi d'acqua poco profondi, in comunicazione con il mare e da questo separate per mezzo di sottili barriere, generalmente sabbiose (solo nei mari tropicali si trovano lagune racchiuse entro barriere coralline), in modo tale che il movimento dell'acqua all'interno di esse sia governato dalla marea.

Le lagune di coste sabbiose sono solitamente formazioni transitorie, rappresentative di una particolare fase di un processo evolutivo costiero sottoposto all'azione di molteplici fattori, perciò sono in stato di perenne instabilità. I fattori principali che agiscono sull'evoluzione fisica delle lagune sono: il trasporto solido dei fiumi (oppure l'accumulo di sabbie provenienti dalla disgregazione di promontori costieri), le correnti marine litoranee, le maree, il moto ondoso e, talora, l'abbassamento del suolo e l'aumento del livello del mare.

I fiumi provenienti da rilievi montuosi di più recente formazione, e quindi soggetti a forte erosione, trasportano molto materiale solido; le sabbie e i limi, che ne costituiscono la parte più fina, riescono a giungere al mare, dando luogo a formazioni protese, i delta. Dalle foci dei fiumi le sabbie ancora in sospensione, o messe in sospensione dal moto ondoso, vengono trasportate dalle correnti costiere, laddove esistono, depositandosi poi, per effetto della gravità, in formazioni allungate dette barre o cordoni litoranei¹. Un tratto di costa compreso tra formazioni deltizie tende così a trasformarsi in un bacino parzialmente isolato dal mare tramite le barre costiere, cioè in una laguna o, al limite, in un bacino totalmente chiuso da un'unica barra, cioè in uno stagno costiero.

I varchi tra le barre costiere generalmente corrispondono a foci di fiumi rimasti inclusi all'interno del bacino lagunare; le formazioni deltizie di questi fiumi contribuiscono a costituire quell'alternarsi di terreni emersi, canali e specchi acquei tipico dei bacini lagunari.

Le barre costiere, su cui il moto ondoso del mare antistante continua a depositare sabbie in forma di dune, si trasformano poi in lidi veri e propri; i varchi tra i lidi sono detti bocche di porto

¹I cordoni litoranei sono strisce di terra che separano la laguna dal mare. Sono elementi sempre instabili, soggetti a processi evolutivi che ne modificano aspetto e struttura fisica a seconda del prevalere delle forze distruttive (fenomeni erosivi dovuti all'azione disgregatrice delle correnti e del moto ondoso) o di quelle costruttive (il ripascimento con nuova sabbia).

o più brevemente porti.

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

L'attenuazione dei valori estremi del livello di marea nelle zone più interne della laguna è, di solito, una condizione necessaria (ma non sufficiente) affinché essa si conservi; nel caso opposto il mare prevale, erodendo, con correnti di marea troppo veloci, tutte le formazioni emerse, compresi i lidi stessi.

Tra le altre cause che determinano la fine di una laguna possono esservi fattori eccezionali e di breve durata, come ad esempio mareggiate molto forti che, accumulando sabbie alle bocche portuali, possono rendere le correnti di marea troppo deboli per ripristinare i preesistenti varchi, innescando un processo di ulteriore accumulo di sabbie fino all'occlusione delle bocche.

Anche il trasporto delle sabbie costiere dalle foci dei fiumi adiacenti, prevalendo sulle correnti attraverso le bocche, può portare all'ostruzione di quest'ultime. E così pure il trasporto solido dei fiumi all'interno di una laguna può lentamente provocarne l'interrimento.

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

Una laguna ha quindi tre possibili destini:

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

Si può dunque concludere che i fattori che concorrono alla formazione di una laguna sono gli stessi che, prevalendo gli uni sugli altri, ne provocano la scomparsa.

2.2 LA LAGUNA DI VENEZIA

2.2.1 Morfologia della laguna

Fin dall'antichità la laguna di Venezia è stata una delle lagune più conosciute in tutto il mondo grazie alla presenza della città di Venezia, posizionata all'incirca nella parte centrale del bacino. E' possibile infatti leggere le parole scritte da Montesquieu nel testo "Viaggio in Italia" (1728) rivolte proprio alla città e alla sua laguna:

Venezia è situata in una palude rinfrescata dalle acque del mare, che comunica soprattutto durante l'alta marea che sale a 2 o 3 piedi, due volte nelle ventiquattr'ore: è una specie di palude chiusa dai lido, con Venezia al centro. I lido sono lingue di terra, strette spesso 12 o 15 passi, e sono protetti dalla forza delle onde, con spese ingenti, da pali e massi di pietra; e una città che era dove si trova oggi Malamocco, sul Lido, un tempo fu spazzata via, e non dal mare, ma dall'impeto dell'inondazione di alcuni fiumi che si gettavano nella laguna, e che poi furono deviati.

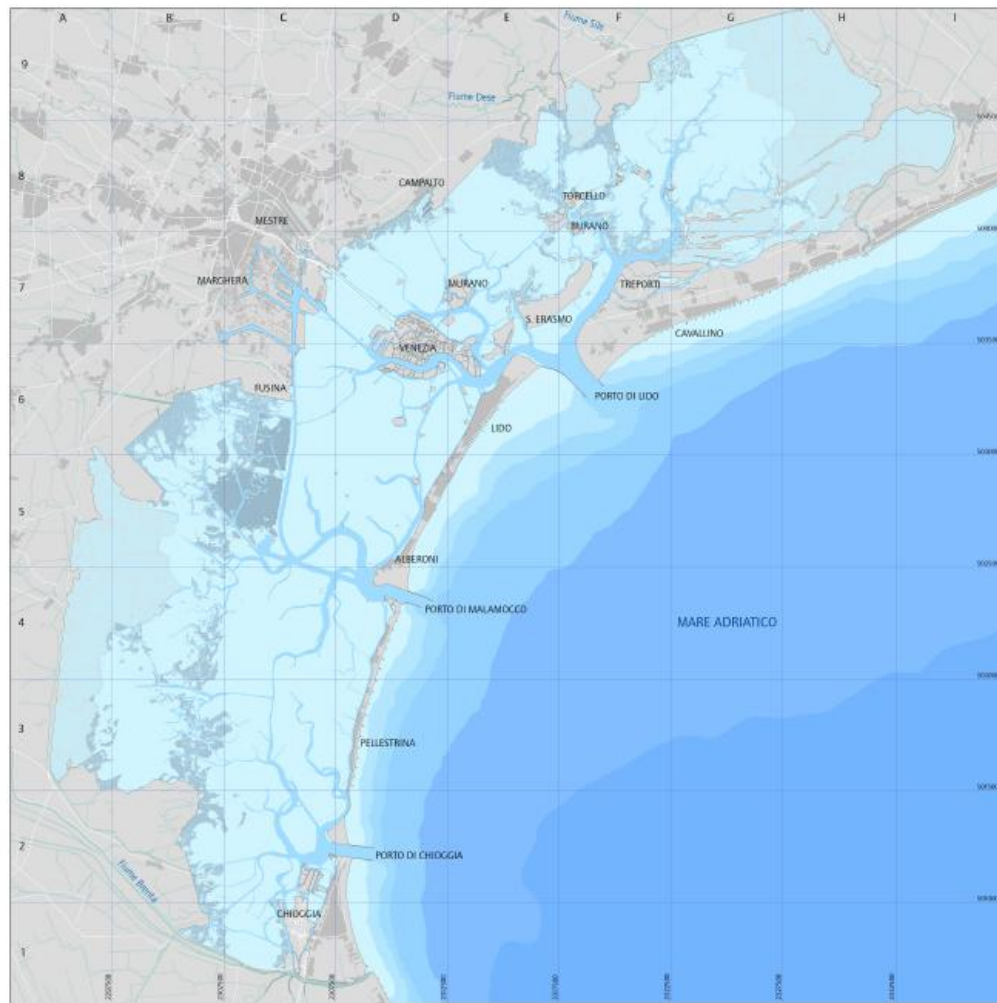


Figura 2.1: Laguna di Venezia

Le acque marine penetrano in laguna attraverso le tre bocche di Lido (la più estesa lunga 800 metri), di Malamocco e di Chioggia (entrambe aventi un'estensione di 400 metri) che danno il nome anche ai rispettivi bacini idraulici. I bacini sono separati tra loro da "linee di spartiacque" che sono più propriamente fasce attraverso le quali non c'è movimento di acqua se non in casi eccezionali: perciò l'acqua marina che entra da una bocca durante la fase di flusso esce dalla stessa bocca durante la fase di riflusso. Ciò avviene in quanto l'alta marea, così 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, determinata dalle azioni attrattive combinate della luna e del sole (marea astronomica) e influenzata inoltre dagli eventi meteorologici (marea meteorologica), viene trasmessa al mare Adriatico dal Mediterraneo, attraverso il canale d'Otranto. Essa assume nell'Adriatico un particolare movimento rotatorio antiorario che, sul lato nord, è diretto dalla costa dalmato-istriana a quella veneta. L'ampiezza dell'oscillazione, qui maggiore rispetto ad ogni altra costa del Mediterraneo, varia secondo un ciclo di quasi quindici giorni da valori massimi in sizigia, quando luna e sole 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 luna e sole formano rispetto alla terra un angolo di 90 gradi.

Un'altra periodicità semidiurna per la quale in un intervallo di 24 ore e 50 minuti si verificano due alte e basse maree è dovuta alla rotazione della terra; il periodo corrisponde al tempo che intercorre tra il passaggio della luna sul meridiano di un luogo e il momento in cui, nello stesso luogo, è massima la forza centrifuga generata dalla rotazione del sistema terra-luna.

Con questa ciclicità, due volte al giorno, le correnti di marea, di flusso e di riflusso, entrano ed escono dalle bocche di porto espandendosi verso le estremità dei rispettivi bacini attraverso la fitta rete di canali che gradualmente si ramificano e si restringono verso l'interno. Questi canali, che in parte si sovrappongono agli alvei degli antichi fiumi, sono il risultato dell'opera di modellazione della marea che ne determina anche l'esistenza.

Gli ultimi e più sottili rami dei canali sono detti *ghebi*²; attraverso di essi la marea raggiunge anche le zone più interne, che in passato erano dette "laguna morta" perchè, quando le bocche non erano sufficientemente ampie, non risentivano se non in modo estremamente limitato dell'azione vivificatrice della marea.

La propagazione della marea all'interno della laguna è infatti condizionata dalla lunghezza e dalla profondità dei canali adduttori e dall'estensione e profondità delle zone interne a basso fondale che i canali alimentano.

Nelle zone interne più distanti dal mare, come quelle ai margini del bacino nord di Lido e del bacino di Chioggia, l'oscillazione di marea arriva, notevolmente attenuata, con un ritardo che va dalle due alle tre ore. Tipiche forme di queste zone interne sono le "paludi" e le *velme*. Le "paludi", il cui nome rimanda a quelle più antiche di origine fluviale, sono bacini minori, a forma di catino, alimentati dai ghebi e caratterizzati da una profondità sufficiente a lasciarli costantemente sommersi; le velme invece possiedono fondali meno profondi. Queste ultime, durante le basse maree, emergono mettendo in evidenza il colore grigio dei fondali particolarmente melmosi; quando vi è un

²I ghebi sono dei piccoli canali con andamento tortuoso che solcano le barene e le velme, collegando le aree più interne con i canali più profondi.

forte accumulo di alghe verdi, assumono invece una colorazione intensa e brillante, che da lontano sembra una rigogliosa prateria.

La distinzione tra zone sommerse e zone emerse in laguna non è affatto netta; le cosiddette zone emerse, come le isole e Venezia stessa, dove sorgono i maggiori insediamenti urbani, sono oggi a loro volta soggette a saltuaria sommersione a causa dell'abbassamento del suolo e dell'eustatismo³.

Tra le zone emerse si includono generalmente le *barene*, forme che più di altre caratterizzano il tessuto lagunare. Esse vengono solo periodicamente sommerse e per questo motivo sono ricoperte di vegetazione alofila; per definizione dovrebbero avere una quota (sul livello del mare) tale da essere sommerse soltanto dalle alte maree di sizigia ma oggi, nelle zone più soggette a subsidenza⁴, la loro quota si è notevolmente abbassata.

Altro elemento caratteristico della morfologia lagunare sono le *valli da pesca*. Costituite da specchi acquei poco profondi detti "laghi" e da addensamenti di barene, erano anticamente alimentate da canali secondari e dai relativi ghebi che facevano parte integrante del tessuto morfologico stesso delle valli. Benchè la loro delimitazione fosse in parte realizzata con argini di fango, la separazione tra la parte interna ed esterna dei canali alimentatori era costituita da arelle, strutture a graticcio di canne palustri, che allo stesso tempo trattenevano il pesce all'interno e consentivano il passaggio, sia pure attenuato, delle correnti di marea.

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

Oltre agli apparati morfologici interni, importanti elementi dell'organismo lagunare sono i cordoni litoranei o lidi. Questi si estendono per una cinquantina di chilometri tra la foce dei fiumi Brenta a sud-ovest e Sile a nord-est, divisi dalle tre bocche di porto nei quattro segmenti di Sottomarina, Pellestrina, Lido e Cavallino. La larghezza dei due tratti insulari va da poche decine di metri a Pellestrina a circa mezzo chilometro al Lido.

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

³L'eustatismo, fenomeno di variazione del livello del mare, è indotto da cambiamenti climatici che influenzano la massa e il volume degli oceani. Infatti durante i periodi freddi le precipitazioni vengono trattenute sotto forma di ghiacci e di conseguenza il livello del mare si abbassa; il contrario avviene nei periodi caldi.

L'innalzamento eustatico del livello del mare, fenomeno indipendente dalla subsidenza, concorre a ridurre l'altimetria del suolo che, va riferita al livello marino.

⁴Tutta la pianura padano-veneta risulta soggetta a una subsidenza naturale, cioè ad un lento abbassamento del suolo (risultato in superficie di una serie di processi che si esplicano nel sottosuolo) dovuto sia a una deformazione tettonica profonda, sia, soprattutto, al compattamento dei depositi fini (silt e argille) recenti. Tale consolidamento si è rivelato più accentuato laddove le acque saline si sono sostituite a quelle palustri determinando fenomeni chimico-fisici che hanno favorito il consolidamento dei depositi di argille e limi. Il processo è avvenuto perciò in modo arealmente differenziato in relazione alla locale composizione dei sedimenti.

Al fenomeno della subsidenza naturale si è aggiunto poi, nel XX secolo e soprattutto a partire dagli anni Trenta con l'insediamento del polo industriale a Marghera, un processo di sprofondamento indotto dall'estrazione intensiva di acqua dalle falde artesiane del sottosuolo per l'approvvigionamento idrico degli stabilimenti. Il prelievo di ingenti quantità d'acqua ha provocato infatti una diminuzione della pressione idrostatica delle falde acquifere, favorendo la compattazione degli strati di sedimenti argillosi-siltosi. Il fenomeno si è arrestato negli anni Settanta con la costruzione del nuovo acquedotto industriale; esso però è stato, anche se per breve tempo, estremamente più intenso della subsidenza naturale. La "subsidenza antropica", pur sospesa, ha causato un abbassamento dei suoli della laguna centrale, ivi compresa la città di Venezia, che non è stato più recuperato.

E' bene ricordare che la subsidenza naturale ha un'evoluzione temporale lenta, avvertibile solo in tempi da storici a geologici, mentre con la subsidenza indotta dalle attività antropiche si hanno effetti avvertibili in tempi brevi.

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



Figura 2.2: Vista su Venezia

2.2.2 Flora e fauna della laguna

Un'analisi descrittiva delle componenti sistematiche relative ai vertebrati che popolano stabilmente o frequentano in determinati periodi l'ambiente lagunare veneziano, deve necessariamente partire dalla conoscenza particolare degli stessi caratteri e delle situazioni d'ambiente che sono tipici della laguna. La descrizione della geografia relativa ai biotopi che formano il mosaico ecosistemico della laguna e dei parametri d'ambiente costituiti dal clima e dalle dinamiche idrauliche, consente infatti di percepire i contorni del quadro complesso costituito dalla realtà lagunare.

Il paesaggio vegetale della laguna di Venezia e dei suoi litorali si inserisce nel contesto tipico delle coste sedimentarie nord-adriatiche, che costituiscono la transizione fra la bassa pianura alluvionale, attraversata dai fiumi che hanno contribuito al suo avanzamento, ed un mare poco profondo come quello Adriatico che rappresenta, nella sua parte settentrionale, la massima estensione verso nord dell'intero bacino mediterraneo.

Le caratteristiche climatiche dell'area la pongono al di fuori di un contesto strettamente mediterraneo, associandola ad un bioclima temperato di tipo oceanico; infatti sono presenti abbondanti precipitazioni durante tutto l'anno e temperature medie non troppo elevate, per cui vengono a mancare i significativi periodi di siccità estiva tipici invece del macrobioclima mediterraneo. Tale clima temperato, però, subisce decisi influssi microtermici dovuti alla vicinanza delle foci dei fiumi

alpini Brenta e Piave e alla particolare esposizione ai venti freddi del quadrante di nord-est (bora), che investono il bacino lagunare soprattutto nei mesi invernali e primaverili.

I fenomeni idrodinamici che caratterizzano la laguna e che sono alla base della ricchezza della componente biotica propria dell'ambiente lagunare, determinano un quotidiano e cospicuo ricambio idrico, con l'invaso e lo svaso di centinaia di milioni di metri cubi di acque marine e salmastre. Le acque lagunari risultano pertanto, nella laguna aperta, o "viva", in movimento pressoché perenne, in direzione delle bocche di porto o provenienti da queste stesse, con evidenti vantaggi in termini di ossigenazione, di autodepurazione meccanica e di trascinamento e diffusione di organismi viventi di tipo planctonico.

Percorrendo un'ideale itinerario normale alla linea di costa e diretto verso l'entroterra, si osserva prima di tutto la presenza del litorale sabbioso. Queste zone litoranee presentano diversi livelli di colonizzazione vegetale, che corrispondono a diverse fasce dell'ecosistema: dalla vegetazione pioniera delle sabbie, a quella propria dei cordoni dunosi, fino al consolidamento delle dune più arretrate.

Alle spalle del litorale si entra nell'ambiente propriamente lagunare, con le profonde foci marine delle bocche di porto e i grandi alvei collettori ai quali si affiancano gli estesi specchi d'acqua della laguna viva, quindi i bassifondali⁵, le velme e infine gli apparati di barena.

Le barene sono estensioni tabulari, limo-argillose, regolarmente sommerse dalle alte maree e colonizzate da vegetazione alofila⁶, costituita cioè da specie particolarmente adattate a vivere su suoli salati, fisiologicamente aridi e pertanto inospitali per la stragrande maggioranza delle piante. Le maree, che nel Golfo nord-adriatico raggiungono le maggiori ampiezze di tutto il mediterraneo, oltre ad influenzare il ricambio idrico della laguna, creano sulle barene e ai margini delle isole numerosi microambienti, caratterizzati da suoli con differente tasso di salinità su cui si sviluppano vegetazioni alofile differenti. Alcune di queste, per le condizioni ambientali assai limitate, sono formate da poche specie assai specializzate; altre invece ne comprendono un numero più elevato, ma a valenza ecologica più ampia.

Sopra la barena, che costituisce senza dubbio l'aspetto più appariscente del paesaggio lagunare, il fitto manto vegetale sembra formare una copertura piuttosto uniforme. In realtà differenti gradi di salinità, che derivano in conseguenza delle lievissime e quasi impercettibili differenze altimetriche della superficie del suolo, portano allo sviluppo di un mosaico di popolamenti vegetali assai affini tra loro.

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

⁵I bassifondi sono aree adiacenti ai canali con quota del suolo inferiore al livello medio del mare.

⁶Questi tipi di vegetazione hanno un ruolo morfologico molto importante. La loro presenza infatti stabilizza il sedimento superficiale, rendendolo inadatto a essere trasportato dalle correnti di marea in seguito alle risospensioni generate dalle onde da vento. Crea inoltre una retroazione positiva con il meccanismo stesso perché la vegetazione aumenta la produzione locale di suolo sia organica che inorganica: la prima è generata dal decadimento del materiale organico che stagionalmente muore, la seconda dall'accresciuta capacità di far sedimentare materiale sospeso trasportato dalle correnti di marea.

Dove la salinità diminuisce ed i suoli risentono della presenza di falde d'acqua dolce, in particolare nelle barene in prossimità della zona di gronda, compaiono praterie caratterizzate dalla densa aggregazione di giunchi. Mentre i siti di gronda in prossimità delle foci dei corsi d'acqua che ancora sfociano in laguna (soprattutto Dese e Silone) sono le aree di massima espressione dei canneti.



Figura 2.3: Barene nella laguna

Per quanto riguarda i fondali lagunari, la vegetazione che li ricopriva fino a poco tempo fa era costituita dalle vaste praterie di fanerogame⁷ che con il loro complesso apparato radicale contribuivano a consolidare i fondali. Oggi queste piante sono molto meno diffuse, mentre molto ricca è la presenza di specie di alghe, anche rare.

Centinaia di specie animali, con riferimento ai soli vertebrati, popolano il variegato ambiente lagunare, monotono su vaste superfici centrali ma ricco di situazioni diversificate nelle fasce geografiche periferiche, in cui la stessa laguna è interessata alle dinamiche di interscambio idraulico ed energetico con i collegati ecosistemi fluviale e marino. Le componenti sistematiche delle molteplici comunità faunistiche lagunari sono caratterizzate dalla presenza decisiva delle due classi dei pesci e degli uccelli. Sia in termini di complessità tassonomica, ovvero di numero di specie, che in termini di biomassa complessiva, ovvero di entità delle popolazioni; esse infatti prevalgono ampiamente, egemonizzando rispettivamente la fase sommersa e la fase emersa dell'ambiente lagunare.

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

⁷Le fanerogame sono piante che si riproducono a mezzo di semi ed hanno foglie, fusto e fiori. Esistono anche fanerogame adattate alla vita in ambienti marini e di transizione e per questo sono dette fanerogame marine le specie presenti nella Laguna di Venezia. Esse sono piante superiori che, grazie allo sviluppo dell'apparato radicale, sono in grado di stabilizzare il sedimento e di attenuare il moto ondoso attraverso una maggiore resistenza data dall'insieme dei ciuffi fogliari.

2.2.3 Il paesaggio lagunare

Nell'insieme la rete dei centri ha il suo traffico più intenso sul versante dei lidi, dove si collocano gli insediamenti più importanti, mentre si dirada avvicinandosi alla linea di gronda verso la terraferma: il regno delle barene, delle velme, dei canali bordati dal canneto.

Nella parte interna si trovano i luoghi meno frequentati: le aree dove i pescatori collocano le reti a seràgia e gli spazi preclusi delle valli da pesca. È la periferia della laguna, in certo senso, con gli spazi più solitari, le aree della “desertificazione acquatica”.

Per chi si inoltra nel dedalo di canali e ghebi che intersecano con fitta orditura la laguna a nord di Burano e Torcello, il paesaggio che si presenta appare estremamente piatto, privo di contrasti forti e dominato da vaste distese d'acqua salmastra. Rispetto al livello medio del mare l'altezza delle isole, delle motte e delle superfici barenicole si misura sempre con la scala dei centimetri, mai dei metri. Frammenti di terre emerse che ciclicamente, in tutto o in parte, vengono coperte dall'acqua con l'arrivo - soprattutto in autunno e in primavera - delle alte maree, mentre nelle fasi di più accentuata bassa marea - d'estate verso l'alba o in gennaio e febbraio nel pomeriggio - emergono vaste plaghe limose che collegano l'un l'altra la miriade di isolotti che costellano la laguna, trasformandola in un'impraticabile pianura fangosa.



Figura 2.4: Paesaggio lagunare

Fatta eccezione per gli insediamenti di Burano, Mazzorbo e Torcello, anche la presenza stabile dell'uomo è ormai virtualmente scomparsa. Sporadici edifici, ruderi di manufatti rurali e di casóni da pesca, sono muta testimonianza delle residue attività legate al settore primario, cessate negli ultimi decenni o esercitate ancora del tutto saltuariamente.

La morfologia dell'area oggi è caratterizzata dalla presenza di una rete di corsi d'acqua con limitata pendenza - ridotti a piccoli canali in cui confluiscono ormai solo le acque dell'immediata gronda - che dall'area continentale scendono lentamente in laguna con andamento erratico e meandriforme, riversandosi quindi in mare attraverso la bocca portuale di San Nicolò del Lido.

Se si perlustra, invece, la parte della laguna delimitata a nordovest dallo storico accesso alla laguna di Fusina, a pochi passi dalle ciminiere di Marghera ma anche dalla palladiana Villa Foscari

la Malcontenta, a sudest da Chioggia e verso il mare dalle isole di Pellestrina e del Lido, si incontrano isole rimaste intatte nei millenni e altre che un tempo furono monasteri, ospedali e luoghi d'accoglienza per chi arrivava dal mare. È il caso di San Servolo o di Poveglia, San Clemente, Sacca Sessola e molte altre ancora che hanno avuto o attendono, dopo decenni di abbandono, una riqualificazione per nuovi usi.

2.2.4 Attività caratteristiche della laguna

La particolare morfologia ambientale, dominata da ampie estensioni lagunari, racchiuse verso il mare dal consolidarsi di cospicue barre litoranee, ha favorito, fin dai tempi più remoti, l'affermarsi di una peculiare organizzazione antropica, costituita da attività ben differenziate. Scandite da precisi ritmi stagionali, tali attività risultano altresì influenzate dai fenomeni idrodinamici, dai caratteri geopedologici e da tutti gli elementi che condizionano la produttività dell'ecosistema lagunare.

Alle attività di pesca e caccia si associò la raccolta del sale e, dove possibile a causa della modesta estensione delle terre emerse, l'agricoltura, definendosi in tal modo un vivace settore primario che costituì la base della successiva civiltà urbana di Venezia. Sono tuttavia caccia e pesca ad esprimere il legame ancestrale tra laguna e comunità umane residenti, poiché con queste stesse attività possono essere identificate le forme dell'economia lagunare più antica e i presupposti stessi della prima civiltà propriamente lagunare. Esse hanno peraltro subito processi evolutivi affatto diversi, con esiti che collocano attualmente il prelievo stagionale di fauna selvatica tra le attività ludiche, mentre confermano per la cattura della fauna ittica un significato economico non irrilevante. In ambedue i casi si manifesta comunque il conflitto, più o meno marcato, tra l'entità del prelievo e la necessità di garantire alle stesse risorse faunistiche la capacità di rigenerarsi, conservando i necessari livelli di densità e di diffusione.

Si può dire che, tenendo conto dei flussi, turistici o locali, delle attività di pesca e delle più diverse attività lagunari, il quadro che la laguna presenta è quello di uno spazio ancor oggi molto dinamico.



Figura 2.5: Pesca in laguna

Capitolo 3

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DELLA LAGUNA

3.1 PREMESSA

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

Nella figura seguente sono evidenziati gli elementi che contribuiscono ad incrementare i fenomeni di squilibrio morfologico e quelli che invece concorrono a stabilizzare il sistema.



Figura 3.1: Schema con le forzanti di modifiche e fattori di resistenza morfologica operanti in Laguna di Venezia

Tra i primi si possono distinguere:

- i processi di subsidenza ed eustatismo;
- il moto ondoso da vento e da natanti;
- le correnti di marea;
- le attività di pesca¹ sui bassi fondali;
- le attività di dragaggio lungo i canali;
- le eventuali modifiche eseguite dall'uomo.

Tra i secondi, vi sono:

- la presenza di fanerogame marine;
- la presenza di sedimenti ad elevata percentuale di sabbia;
- gli apporti di sedimenti provenienti dal bacino scolante e dal mare.

Alcuni processi e fattori presenti, naturali ed antropici, globali e locali, stanno causando nuovi cambiamenti che sembrano portare verso una “marinizzazione” della laguna di Venezia, trasformandola in un vero e proprio braccio di mare. Infatti negli ultimi tempi la laguna sta sperimentando in modo sempre più evidente gli aspetti negativi di intensi processi erosivi, particolarmente nella parte centrale del suo bacino all'interno del perimetro formato dai grandi canali che si dipartono dalle bocche di Lido e di Malamocco e dai canali realizzati dall'uomo nel corso del XX secolo per permettere alle navi moderne, di maggior pescaggio, l'accesso ai porti interni.

Come conseguenza di tali fenomeni la laguna va perdendo le sue forme originali caratterizzate da fondali poco profondi, innervati da una potente rete di canali che giunge fin quasi ai suoi margini, portandovi i benefici effetti del periodico alternarsi delle maree e contribuendo in modo decisivo al ricambio delle acque.

Un tempo la fascia della laguna più prossima alla conterminazione², la cosiddetta “laguna morta”, era ricca di barene, le cui quote erano sufficientemente elevate per essere sommerse dalle acque

¹Le attività della pesca dei molluschi che utilizzano imbarcazioni con motori fuoribordo infissi a rovescio per arare il fondo, risospingere il primo strato di melma e raccogliere rapidamente le vongole a strascico dalla barca, possono devastare il fondo lagunare arandolo lungo traiettorie con raggi surreali. L'aratura del fondo è causa di profondo degrado perché altera radicalmente la struttura delle comunità bentiche, la struttura topografica locale e la stabilità dei sedimenti superficiali. Senza la protezione fornita dalle comunità bentiche, i sedimenti superficiali della laguna perdono ogni coesione e sono ridotti ad una specie di cipria che qualunque corrente solleva e sparge dappertutto.

²La linea di conterminazione lagunare delimita i confini del bacino lagunare ovvero dell'area di competenza gestionale e amministrativa del Magistrato alle Acque di Venezia. L'esigenza di tracciare il confine lagunare fu avvertito dalla Repubblica di Venezia sin dal primo '600, per definire in modo preciso i limiti territoriali entro i quali far valere le disposizioni e i regolamenti a salvaguardia della laguna. Al termine di una gestazione lunga quasi due secoli, la linea di conterminazione fu fissata nel 1791 attraverso l'erezione di 99 cippi in modo tale che il tracciato che li univa delimitasse il territorio lagunare separando ciò che era salmastro dal resto. La linea venne modificata nel 1924 con un nuovo tracciato che ripercorreva essenzialmente quello storico, eccetto nell'area del così detto “Delta del Brenta”, escludendo dal perimetro lagunare gli antichi dossi di Conche e Fogolana (laguna sud). Con Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici, nel 1990 è stato aggiornato il tracciato della conterminazione lagunare, per adeguarlo ai cambiamenti morfologici naturali e antropici avvenuti nei due secoli trascorsi. L'attuale confine include così nello specchio lagunare le tre bocche di porto e l'isola di S. Erasmo.

solamente durante le fasi di più spinta alta marea. Tra le barene, solcate da una miriade di piccoli canali, si interponevano chiari d'acqua poco profondi, creando un tessuto morfologico estremamente articolato, a sua volta funzionale ad accrescere, dal punto di vista idrodinamico, il ruolo dei fenomeni dispersivi e, quindi, a favorire un migliore ricambio delle acque nelle zone idraulicamente più lontane dalle bocche.

La laguna, anche a causa dell'azione congiunta dell'innalzamento del livello medio del mare e della subsidenza del suolo, ma non solo, ha visto drasticamente ridursi, soprattutto durante l'ultimo secolo, le superfici occupate dalle barene. Parallelamente si sono incrementate le profondità delle velme e delle zone d'acqua che si affiancano ai canali. Oggi, i bassifondi della "laguna viva" non si scoprono più nemmeno durante gli stati di bassa marea eccezionale.

La tendenza all'approfondimento generalizzato dei fondali delle zone d'acqua ha di fatto annullato l'antico ruolo idrodinamico dei canali lagunari nel controllo della propagazione della marea, modificando radicalmente il regime delle correnti in quasi tutta la laguna.

Allo scopo di evidenziare in quale misura gli effetti delle opere realizzate dall'uomo hanno contribuito all'evoluzione morfologica della laguna nel corso degli ultimi secoli, sovrapponendosi ai processi naturali da sempre in atto nell'area lagunare, si analizzano brevemente alcune mappe e carte idrografiche raffiguranti la laguna di Venezia nelle sue principali fasi storiche.

Le sette mappe prese in esame sono inserite in coda al capitolo per snellirne lo sviluppo senza comprometterne la leggibilità e per consentire un miglior confronto tra esse rendendo più pratica e immediata l'osservazione delle loro diversità.

3.2 LETTURA DI MAPPE STORICHE E CARTE IDROGRAFICHE

Mappa della laguna di Venezia redatta da Cristoforo Sabbadino (1556)

La mappa (figura 3.2) fornisce una rappresentazione complessiva dello stato del territorio veneto compreso tra la foce dell'Adige, al limite meridionale, e la foce del Piave, al limite settentrionale. Essa delinea lo stato della laguna in un momento cruciale della sua evoluzione, quando, si decise che il Brenta dovesse essere estromesso dalla laguna e portato assieme al Bacchiglione direttamente al mare attraverso la foce della laguna di Brondolo.

Il problema dell'interrimento di vaste superfici della laguna di Venezia a opera del Brenta trovò soluzione solamente con l'adozione di questo drastico provvedimento, dopo esser stato invano contrastato nel corso del XIV secolo con gli interventi di intestadura³, e ancora nel secolo successivo con la realizzazione di una serie di diversivi.

³Le prime testimonianze storiche di interventi in difesa della laguna da parte della Repubblica di Venezia risalgono al XIV secolo. Inizialmente furono rivolti a contenere con arginature le piene dei corsi d'acqua sfocianti in laguna, per evitare che i loro apporti solidi provocassero quegli impaludimenti che rendevano l'ambiente invivibile. Purtroppo questo tipo di opere di contenimento - come l' "argine di intestadura", costruito a partire dal 1330 davanti alla foce del Brenta a Fusina - favoriva le esondazioni a monte senza risolvere il problema dell'impaludimento.

Pure al XIV secolo risalgono le prime notizie di interventi a difesa dei litorali che, soggetti alla subsidenza e aggrediti dal mare dopo l'aumento del suo livello, erano stati ripetutamente danneggiati. Solo nel XVIII secolo sarà però messo a punto un intervento innovativo e risolutore: la costruzione dei *murazzi* lungo il versante a mare dei litorali, il cui completamento avverrà pochi anni prima della caduta della Serenissima (1785).

L'estromissione del Brenta e del Bacchiglione ebbe esiti decisivi per le sorti della laguna e segnò l'inizio di una inversione di tendenza nella sua evoluzione morfologica. Dominata fino a quel momento dai fenomeni di deposito dei sedimenti intromessi dalle correnti fluviali, la laguna incominciò ad essere interessata da processi erosivi.

Nella mappa appare in tutta evidenza la potente struttura dei canali lagunari che si dipartono dalle bocche di porto e, penetrando verso l'interno, innervano l'intero bacino lagunare, giungendo con ramificazioni successive, anche minute, fino ai limiti delle terre basse che si affiancano alla laguna. Ben delineata è la morfologia generale dei lidi che delimitano sul lato a mare la laguna e si affiancano alle bocche, confinandole. Pur non rappresentate dalla mappa, opere di difesa sporgenti dalla linea di riva sono già presenti in alcuni tratti di litorale contro gli attacchi del mare e a protezione delle foci. Ai limiti della laguna viva, sono rappresentate con colori più tenui le zone occupate dalle barene (oltre 250 km^2). Egualmente rappresentate sono le superfici, ben più estese, delle terre basse che fanno da corona alla laguna, identificabili per essere interpunte da numerosi specchi d'acqua permanenti, alcuni di apprezzabili dimensioni.

Bisogna dire che tra il XV e il XVII secolo, la dislocazione delle valli da pesca e i loro effetti idraulici, giudicati negativi per la salvaguardia della laguna, furono al centro di vivaci discussioni, sovrapponendosi alla questione della diversione dei fiumi, peraltro ben più decisiva per il destino della laguna.

Mappa della laguna di Venezia redatta da Angelo Emo (1763)

La mappa (figura 3.3) illustra lo stato della laguna a poco meno di un secolo dagli ultimi grandi interventi attuati dalla Repubblica di Venezia a difesa della propria laguna. Ai limiti del bacino centro-meridionale sono ben individuati nella carta il nuovo corso del Brenta e del Bacchiglione, insieme al tracciato del nuovo canale artificiale, il Taglio Novissimo il quale, scavato nel 1610, scorre ai limiti della laguna e si dirige a sua volta verso Brondolo.

Si osserva anche la diversione del Piave (1664-1682), che ora sfocia a Cortellazzo, compiuta perchè l'apporto dei suoi sedimenti ai cordoni litoranei creava non pochi problemi alle foci lagunari che alimentavano la laguna superiore e una parte della laguna centrale, favorendo la formazione di fronte alle foci stesse di depositi di sabbia potenti e la presenza di fondali poco profondi.

Inoltre fu decisa l'estromissione del Sile, fiume di risorgiva, in quanto si riteneva che le sue acque dolci, ristagnando lungo il margine interno lagunare, fossero portatrici di malaria.

Così, con quest'ultima diversione, si realizzava, seppur non puntualmente rispetto alla proposta originale, il grande piano sviluppato con soluzioni concrete da Cristoforo Sabbadino per distogliere i maggiori fiumi dalla laguna.

Si può dire che al tempo di Angelo Emo, canali naturali e artificiali, aree di barena, bassi-fondi e chiari d'acqua costituiscono nel loro insieme un sistema con significative variazioni planaltimetriche rispetto al livello medio del mare, determinando per l'ambiente lagunare una configurazione che, a parità di altre condizioni, incrementa i fenomeni dispersivi e favorisce i processi di ricambio delle acque nelle parti della laguna idraulicamente più lontane dalle bocche.

All'interno della rete idrografica si riconoscono i canali scavati dall'uomo, particolarmente numerosi ai margini della laguna centrale di fronte alla bocca di Malamocco. Si tratta di canali con

tracciato pressoché rettilineo, che si distingue rispetto a quello dei canali lagunari, il cui assetto planimetrico è invece piuttosto irregolare e si caratterizza per la presenza in rapida successione di curve e controcurve, come è tipico degli assetti fluviali meandriforme.

Carta idrografica della laguna di Venezia redatta da Augusto Dénaix (1810)

L'importanza della carta (figura 3.4), ottenuta sulla base dei rilievi eseguiti dal capitano Augusto Dénaix, è legata al fatto che per la prima volta è possibile conoscere in modo generale lo stato dei fondali dei canali che, dipartendosi dalle bocche, incidono i bassifondi e le barene della laguna di Venezia. Tale carta fornisce, quindi, un'illustrazione accurata delle condizioni della laguna prima dei grandi interventi che saranno realizzati a opera dell'uomo nel XIX e nel XX secolo per favorire la navigazione.

Essendo le finalità del capitano soprattutto militari, grande cura è posta nella ricognizione dello stato dei fondali delle bocche di porto e del tratto di canale immediatamente antistante. I punti rilevati sono sufficientemente estesi e numerosi per essere interpretati a curve di ugual livello e per fornire una visione sintetica, ma molto interessante, dell'assetto plano-altimetrico dei canali di porto.

Pur in condizioni di scambi di portata con il mare apprezzabilmente meno vivaci di quelli attuali, la rete dei canali lagunari descritta dal rilievo è egualmente ben incisa e potente. Essa presenta dal punto di vista morfologico caratteristiche generali non molto diverse da quelle delle reti descritte nei rilievi eseguiti in epoca successiva.

Nonostante fossero passati quasi tre secoli dall'estromissione del Brenta dalla laguna, i fondali dei bassifondi adiacenti ai canali sembrano aver conservato profondità modeste rispetto al livello medio del mare, valutabili mediamente in non più di una cinquantina di cm, forse non molto diverse per la laguna viva da quelle esistenti all'epoca dell'allontanamento del fiume. Si tratta in ogni caso di fondali poco profondi, scoperti per la loro quasi totalità durante le normali basse maree.

Le superfici di barena, che si estendono tra i limiti della laguna viva e la conterminazione, sono molto estese (all'incirca 180 km^2) e rappresentate con un buon dettaglio planimetrico. Le barene sono incise da una minuta quanto diffusa rete di piccoli canali, attraverso i quali l'onda di marea può giungere fino ai limiti estremi del bacino lagunare, attivandovi quei meccanismi idrodinamici che, sia pure con tempi caratteristici più lunghi di quelli della laguna viva, permettono il ricambio delle acque nelle aree idraulicamente più lontane dalle bocche.

Carta idrografica del 1901

La carta idrografica del 1901 (figura 3.5) fornisce per la prima volta una rappresentazione complessiva e generale della batimetria della laguna, condensando i risultati dei rilievi restituiti in 18 tavolette in scala 1:15000 (predisposte dal Corpo Reale del Genio Civile di Venezia) nelle quali sono reperibili dati sufficientemente accurati sulle profondità dei canali della rete principale e sui tiranti d'acqua dei bassifondi adiacenti e sono inoltre riportate le quote delle superfici occupate dalle barene in un discreto numero di punti.

Emergono dal confronto con la carta redatta da Dénaix alcune importanti differenze, che meritano un commento specifico per le loro conseguenze sulla successiva evoluzione della morfologia lagunare. Si tratta di variazioni riconducibili innanzitutto agli interventi realizzati dall'uomo alle bocche di porto, per adeguarle alle esigenze della moderna navigazione⁴.

La bocca di Malamocco, la prima sulla quale si è intervenuti, è da circa trent'anni (1872) protetta da moli sui due lati, che si protendono nel mare antistante fino a raggiungere fondali di circa 10 metri. In seguito a questo intervento la corrente era riuscita, infatti, a incrementare progressivamente le profondità della bocca, rimuovendo naturalmente i depositi di sabbia della barra di foce e risolvendo quei problemi di officiosità contro i quali gli antichi idraulici al servizio della Repubblica avevano per alcuni secoli lottato invano, senza esiti di qualche rilievo.

Importanti modificazioni si riscontrano anche sul litorale della laguna superiore, dove gli antichi "tre porti" sono ora scomparsi, essendo stati riuniti da quasi 10 anni nell'unica nuova bocca di Lido. I moli, data la complessa configurazione morfologica dei "tre porti", sono apprezzabilmente più lunghi di quelli realizzati a Malamocco: nel tratto terminale che si affaccia al mare le due dighe si dispongono l'una parallela all'altra, mentre divergono progressivamente tra loro, allontanandosi, dalla parte della laguna.

Contrariamente a quanto era accaduto a Malamocco, dove la barra di foce esterna era stata naturalmente demolita dalle correnti, all'uscita tra le dighe di Lido le profondità si mantengono ben al di sotto delle aspettative e non riescono a superare gli 8 metri, insufficienti rispetto al pescaggio delle navi di maggiore stazza dirette a Venezia, che perciò continuano ad entrare in laguna tramite la bocca di Malamocco.

Fondali del tutto confrontabili con le condizioni ottocentesche si rilevano, invece, alla bocca di Chioggia, per la quale la costruzione dei moli si va concretizzando solo dal punto di vista progettuale.

Il nuovo stato dei fondali alle bocche favorisce gli scambi di portata mare-laguna attraverso il varco di Malamocco, che si va conseguentemente potenziando dal punto di vista idrodinamico a danno delle contigue bocche di Chioggia e di Lido, determinando aumenti del fondale anche nei grandi canali che da esso si dipartono.

Nel complesso la propagazione della marea all'interno della laguna resta dominata dalle forze dissipative, che prevalgono su quelle inerziali, registrandosi ovunque all'interno della laguna riduzioni sia dei colmi sia dell'ampiezza di marea rispetto al mare.

La rete dei canali lagunari interni, ben incisa tra i bassifondi e topologicamente molto articolata, conserva tutta la sua efficienza idraulica, controllando decisamente il fenomeno della propagazione di marea.

Le profondità delle zone d'acqua adiacenti ai canali assumono valori modesti. Per la parte di laguna che resta compresa tra le bocche di Malamocco e di Lido e i grandi canali che da esse

⁴Gli interventi che più caratterizzano il periodo tra il XIX e il XX secolo sono stati quelli volti a risolvere i problemi relativi all'insabbiamento delle bocche portuali per opera delle correnti litoranee. Le tre bocche infatti - ultime rimaste dopo l'occlusione della gran parte delle antiche, numerose foci - si rivelavano, all'epoca, insufficienti sia agli scopi della nuova navigazione a vapore, sia ad assicurare il ricambio delle acque lagunari già inquinate dagli scarichi dei primi insediamenti industriali. Era quindi necessario progettare bocche portuali di sezione adeguata all'estensione dei tre bacini idraulici, delimitate e protette da moli foranei protesi in mare fino a raggiungere fondali di una certa profondità e capaci inoltre di bloccare le migrazioni costiere delle sabbie. Il fine doveva quindi essere quello di determinare un nuovo assetto idraulico-morfologico adatto agli scopi della navigazione, ma anche in grado di stabilizzarsi nel tempo a seguito di un raggiunto equilibrio tra mare e laguna.

dipartono, le profondità sono mediamente di poco inferiori ai 50 cm con riferimento al medio mare.

Per quanto riguarda le superfici occupate dalle barene, una prima osservazione che si può formulare riguarda la loro estensione. All'interno del perimetro della conterminazione definito nel 1792 le aree occupate dalle barene sono di poco variate rispetto alla laguna ottocentesca, essendo valutabili in circa 170 km^2 . Esse si distribuiscono su superfici morfologicamente molto articolate, comprendendo al loro interno specchi d'acqua più o meno estesi, ma generalmente di modesta profondità. Con buona approssimazione si può ritenere che nelle diverse epoche, dopo l'estromissione dei fiumi, le quote delle barene rispetto al medio mare non abbiano subito sostanziali modificazioni nel tempo, pur essendosi progressivamente ridotta l'estensione delle loro superfici a causa di processi di erosione a prevalente sviluppo orizzontale, inizialmente moderati e in seguito, dopo il completamento dei moli a tutte le bocche di porto, con manifestazioni sempre più intense.

Carta idrografica del 1932

La carta (figura 3.6) è stata ricostruita alla scala 1:75000 partendo dai rilievi eseguiti a cura dell'Ufficio Idrografico del ricostruito Magistrato alle Acque.

Emergono, per confronto con la carta idrografica del 1901, alcune importanti differenze, in parte dovute ai naturali fenomeni di evoluzione del bacino lagunare da sempre in atto nell'area costiera di Venezia (variazione del livello medio del mare e subsidenza del suolo), in parte determinate dalle opere eseguite dall'uomo sia sulle bocche di porto sia all'interno della laguna.

Alla bocca di Lido, dopo la completa rimozione mediante dragaggio della barra di foce, i fondali sembrano aver raggiunto una nuova condizione di sostanziale equilibrio. Si riscontrano, lungo l'asse del canale di navigazione, profondità più che adeguate per permettere alle navi di accedere al porto di Venezia.

A Malamocco i fondali presentano qualche modesto incremento rispetto alla situazione descritta dalla carta del 1901; ne consegue un maggiore contributo di questa bocca agli scambi complessivi di portata mare-laguna.

Importanti modificazioni si riscontrano per la bocca di Chioggia, alla quale toccò in ultimo subire gli stessi provvedimenti sperimentati sulle altre due bocche. Anche in questo caso le profondità raggiunte tra le dighe sono più che sufficienti per le necessità della navigazione del tempo.

Gli esiti di questi interventi sono stati sicuramente positivi per la navigazione, meno esaltanti, invece, se si guarda al comportamento idraulico delle bocche armate, molto diverso rispetto a quello dei varchi naturali, e ai pesanti riflessi negativi sui problemi della salvaguardia dei fondali e delle strutture morfologiche della laguna.

La rete dei canali interni, ben articolata e potente nei suoi elementi principali fin quasi ai limiti interni della laguna, controlla la propagazione della marea e domina ancora l'idrodinamica di tutto il bacino lagunare.

Un'ulteriore novità è costituita dal ponte stradale, che si affianca al ponte ferroviario, ripetendone la struttura e potenziando il collegamento della città con la terraferma. I due ponti, ferroviario e stradale, hanno ovviamente rilevanza trasportistica, ma producono insieme interferenze idrauliche non tanto sul regime delle correnti di marea, quanto piuttosto a causa della loro capacità di

schermare la laguna centrale, smorzando la propagazione in direzione Sud-Ovest del moto ondoso generato dai venti di Bora.

Inoltre, tra il 1920 e il 1925, viene scavato il canale Vittorio Emanuele. Questo nuovo canale, sicuramente fondamentale per la navigazione diretta a Porto Marghera, innesca, tuttavia, processi morfodinamici che sul medio e lungo periodo si rifletteranno con apprezzabili effetti sull'ambiente lagunare.

Dal punto di vista idrodinamico, data la sua profondità, il canale Vittorio Emanuele costituisce inevitabilmente una via preferenziale alla propagazione della marea lungo la direttrice bocca di Lido-S.Nicolò-Punta della Salute-Marghera. Pertanto dalla bocca di Lido, l'onda di marea può raggiungere i bordi della conterminazione lagunare più velocemente di quanto non avvenga nelle zone adiacenti, controllate dal punto di vista idrodinamico da canali naturali meno profondi e quindi meno attivi rispetto al fenomeno. Ne derivano modificazioni locali del regime delle correnti di marea, con conseguenze negative per le zone d'acqua e per i canali più prossimi alla via navigabile⁵. Investiti da significative correnti trasversali rispetto al loro asse, questi canali incominciano ad essere interessati da fenomeni di interrimento per sedimentazione dei materiali erosi dai bassifondi adiacenti, coinvolgenti lo stesso canale Vittorio Emanuele. Il tutto è aggravato dalle correnti indotte localmente dal dislocamento di importanti volumi d'acqua, determinato dal passaggio delle stesse navi con sezioni di carena importanti rispetto a quelle del canale.

Quanto alle profondità dei bassifondi adiacenti alla rete dei canali principali, il confronto con il rilievo del 1901 mette in evidenza modesti incrementi. Si tratta, però, di valori che non possono essere ricondotti ai soli processi di eustatismo e subsidenza e segnalano la sovrapposizione su di essi di fenomeni erosivi sostenuti da cause diverse.

Una conferma indiretta dei processi di erosione in atto all'interno della laguna è fornita d'altra parte dall'estensione delle superfici occupate dalle barene. Secondo i rilievi sintetizzati nella carta idrografica, rispetto alla precedente configurazione (1901) tali superfici si sono ridotte di circa 60 km^2 , prova inequivocabile della presenza di diffusi fenomeni erosivi in senso orizzontale. Questi fenomeni, demolendo i bordi delle fasce di barena, rimettono a disposizione del sistema lagunare, almeno parzialmente, quei sedimenti che un tempo, prima dell'estromissione dei fiumi, erano direttamente forniti dagli apporti fluviali. Per questo motivo sono al momento relativamente contenuti i processi erosivi in senso verticale, come è comprovato dalle limitate variazioni della profondità media nella laguna centrale.

Carta idrografica del 1970

La carta (figura 3.7) è stata realizzata dall'Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque sulla base dei rilievi eseguiti negli anni immediatamente precedenti, dopo la grande alluvione del novembre

⁵Generalmente i canali sono in equilibrio dinamico con i bassi fondali circostanti: i sedimenti, durante un ciclo mareale, vengono trasferiti dai canali ai bassi fondali durante la fase di flusso e dai bassi fondali verso i canali nella fase di riflusso. Le condizioni non sono più verificate quando vengono alterati gli equilibri dinamici dell'ambiente, principalmente a causa della realizzazione di canali artificiali che cambiano i tracciati naturali e/o le sezioni dei canali stessi.

L'appiattimento dei fondali e l'interramento dei canali risultano strettamente correlati. I canali infatti si interrano con i sedimenti provenienti dai bassi fondali adiacenti, grazie alla loro capacità di muovere i flussi d'acqua da e verso questi. A seguito di questa trasformazione la marea si propaga anche attraverso i bassi fondali, producendo una ulteriore erosione.

1966.

Si tratta di una configurazione della laguna alquanto modificata rispetto a quella precedente (1932). Accanto al nuovo canale navigabile Malamocco-Marghera (Canale dei petroli) compaiono tra l'altro le estese superfici imbonite per accogliere la III Zona Industriale di Porto Marghera e altre aree di minore estensione, come ad esempio quelle dell'aeroporto di Tessera, e l'isola del Tronchetto a loro volta sottratte alla laguna per soddisfare le necessità di sviluppo della città.

A Malamocco i fondali risentono già degli effetti dovuti all'apertura del nuovo canale navigabile che collega Malamocco a Marghera. Le profondità, infatti, risultano apprezzabilmente superiori a quelle segnalate dal rilievo del 1932, testimonianza indiretta del fatto che la bocca, a parità di altre condizioni, è interessata da un più intenso scambio di portate con il mare. La parte di bacino lagunare dominata dalla bocca di Malamocco si va pertanto ampliando a scapito di quelle controllate rispettivamente dalle bocche di Lido e di Chioggia.

Importanti modificazioni sono evidenziate anche all'interno della laguna, innanzitutto per quanto riguarda la struttura della rete dei canali interni. Ciò è dovuto al tracciato del nuovo canale, infatti, mentre nel primo tratto, seppur seguendo un tracciato perfettamente rettilineo, esso assume una direzione simile a quella dei canali naturali che si dipartono dalle bocche, nel tratto successivo la nuova via d'acqua si dispone secondo una direzione del tutto anomala, tagliando quasi ortogonalmente i canali esistenti e creando dal punto di vista idrodinamico importanti modificazioni dell'originale assetto del campo di moto.

Le molte polemiche sorte intorno al ruolo negativo del nuovo canale sull'aumentata frequenza delle "acque alte" a Venezia sono prive di fondamento, essendo di pochi cm i suoi effetti sull'incremento dei colmi nel Centro Storico, per le maree non dominate dalla componente meteorologica, e praticamente nulli per queste ultime.

Devastante è invece la sua presenza sulla circolazione idrodinamica nella laguna centrale e sulle trasformazioni della morfologia lagunare registrate negli anni successivi alla sua costruzione⁶. Bisogna infatti dire che, la rete dei canali naturali continua ad avere un ruolo significativo nella propagazione della marea in quasi tutta la laguna, esclusa la parte centrale compresa tra le bocche di Lido e di Malamocco. Qui perdono importanza nel fenomeno propagatorio i canali naturali rispetto a quelli artificiali (Malamocco-Marghera e Vittorio Emanuele) e i gradienti istantanei di livello sono apprezzabilmente modificati rispetto alla configurazione della laguna del 1932, con conseguenze negative sul regime delle correnti di marea.

Relativamente ai fondali delle zone d'acqua adiacenti ai canali, il rilievo segnala un loro generale approfondimento. Nella laguna centrale, esclusi i canali, la parte che rimane compresa tra le bocche e i grandi canali navigabili presenta profondità medie di circa 1 metro, alquanto superiori a quelle risultanti dal rilievo del 1932 per la stessa parte di laguna (0,60 metri).

⁶Il ruolo negativo del canale dei petroli è legato anche ai fenomeni dovuti alla navigazione delle grandi navi, le quali hanno sezioni di carena del tutto confrontabili con quella della via d'acqua artificiale e producono nel loro avanzamento il dislocamento di volumi d'acqua particolarmente importanti. Spinti sulle zone d'acqua poco profonde adiacenti al canale, i volumi dislocati generano correnti particolarmente intense che, sovrapponendo i loro effetti erosivi a quelli dei caratteristici sistemi d'onda di prua e di poppa della nave, demoliscono i bassifondi laterali, approfondendoli. Le correnti di ritorno che si chiudono sulla poppa della nave fanno rifluire il materiale risospeso sui bassifondi verso il canale, interrandolo. L'erosione dei bassifondi adiacenti e l'interrimento del canale sono le due facce di una stessa medaglia e sono entrambe assolutamente negative per la morfologia lagunare.

Quanto alle superfici di barena, la carta conferma l'intensità dei fenomeni erosivi che colpiscono l'intero bacino lagunare in senso orizzontale, i cui effetti si riflettono inesorabilmente a danno di queste forme. All'interno del perimetro dell'attuale conterminazione la superficie complessiva delle barene, escluse le valli da pesca, scende a poco meno di 46 km^2 , con una riduzione rispetto al rilievo del 1932 di circa 25 km^2 . Sempre all'interno dell'attuale conterminazione, ma comprendendo le barene delle valli da pesca, le superfici occupate da tali forme passano nello stesso periodo da 104 km^2 (1932) a circa 64 km^2 (1970).

Infine, nel bacino di Chioggia, viene costruita una nuova strada, la Strada Statale Romea, che tagliando la laguna altera il regime delle correnti negli specchi d'acqua che si collocano fra la strada stessa. Anche questa scelta idraulicamente infelice avrà modo di rendere manifesti i suoi effetti negativi sull'area lagunare parzialmente marginata.

Carta idrografica del 2003

La carta (figura 3.8) è stata realizzata sulla base dei rilievi eseguiti intorno agli anni 2000 a cura del Magistrato alle Acque di Venezia. È stata costruita utilizzando i più recenti rilievi batimetrici e topografici disponibili, in modo da permettere un immediato, agevole, confronto con le precedenti carte idrografiche della laguna.

Rispetto alla situazione del 1970 le variazioni morfologiche sulle quali richiamare l'attenzione sono numerose e importanti. Esse testimoniano un degrado generalizzato preoccupante, se si guarda ai problemi complessivi della salvaguardia della morfologia lagunare.

Partendo dai lidi, che separano la laguna dal mare, continua a ridosso della diga nord di Lido l'avanzamento del litorale del Cavallino, che ha ormai praticamente raggiunto la testata del molo. Le sabbie, mobilitate sotto riva dal moto ondoso e trasportate al fondo e in sospensione dalle correnti, possono quindi superare le strutture aggettanti e interferire nuovamente in modo significativo con il regime dei fondali della bocca, penetrando lungo il porto canale e interessando anche i canali che si dipartono dalla bocca stessa. Essendo prevalentemente mobilitate sabbie fini, il fenomeno interessa peraltro solo il primo tratto dei canali che si dipartono dalla bocca, dove le maggiori velocità consentono il trasporto al fondo e in sospensione dei sedimenti di maggiore diametro.

Esaminando i fondali tra i moli, se per la bocca di Lido sono sempre richiesti periodici interventi di dragaggio per garantire i valori minimi necessari alla navigazione, la bocca di Malamocco continua ad essere interessata da fenomeni di approfondimento. Innescati in una prima fase dalla costruzione dei moli e successivamente sostenuti dallo scavo del canale navigabile dei petroli, tali approfondimenti sono un indice morfodinamico inequivocabile di contemporanee importanti modificazioni del regime sia degli scambi di portata mare-laguna sia delle correnti nel retrostante sistema lagunare.

Parallelamente alle profondità medie si sono incrementate le portate scambiate. Basti ricordare che nello stesso periodo di tempo, durante le maree di sizigie, le massime portate entranti in laguna attraverso la bocca di Malamocco sono aumentate di quasi il 70% a conferma di una attività idrodinamica del tutto anomala rispetto al passato.

Importanti modificazioni si rilevano nei rapporti tra le profondità dei canali e delle zone d'acqua che li affiancano. Le variazioni sono particolarmente evidenti ancora nella parte della laguna che

rimane compresa tra le bocche di Lido e di Malamocco e il grande anello dei canali periferici che la circondano, formato tra gli altri dai canali Malamocco-Marghera e Vittorio Emanuele.

Non considerando i canali, in questa parte della laguna la profondità media è ora di 1,45 metri, a fronte di valori di 1 metro risultanti dal rilievo batimetrico del 1970. Si è ben lontani quindi non solo dalla condizione descritta da Augusto Dénaix nei primi anni dell'Ottocento, quando questa zona era quasi completamente lasciata dalle acque durante le fasi più spinte di bassa marea, ma anche da quella cartografata per la laguna del primissimo Novecento, caratterizzata mediamente da profondità di poco inferiori ai 50 cm. Nell'arco di appena un secolo si riscontrano, infatti, nella laguna centrale incrementi di profondità media di quasi 1 metro, ben superiori agli effetti congiunti della subsidenza e dell'eustatismo, che non possono pertanto essere invocati come unica causa del fenomeno. L'indiscutibile processo erosivo osservato a danno della laguna è stato intensificato dall'opera dell'uomo attraverso i suoi numerosi, importanti, interventi.

Ne deriva una generale tendenza all'appiattimento⁷ dei fondali in tutta la laguna centrale, che si sovrappone al già ricordato approfondimento. Le conseguenze idrodinamiche del fenomeno sono rilevanti. Diversamente da un tempo, la propagazione della marea all'interno della laguna non è più controllata dalle forze dissipative, che ne attenuavano progressivamente i colmi e i cavi a misura che ci si allontanava dalle bocche. La propagazione 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. Fa eccezione rispetto a questo comportamento la laguna superiore, dove le ampiezze e i colmi di marea si attenuano ancora, sia pure in misura più ridotta del passato.

Volgendo ora l'attenzione alle variazioni delle superfici occupate dalle barene, che fra tutti è forse il segnale più avvertibile dei processi di erosione che colpiscono il bacino lagunare, si riscontrano in termini assoluti, modeste riduzioni di estensione di queste forme rispetto al 1970. Valutate invece in termini percentuali, le variazioni osservate sembrano descrivere una situazione di apparente stazionarietà, forse riconducibile in parte ai fenomeni (per esempio le due casse di colmata che dovevano essere destinate allo sviluppo della III Zona Industriale) che hanno portato nuove superfici a far parte del sistema delle barene, mitigando gli effetti dei processi di erosione e sommersione a danno delle forme residue.

3.3 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Fino al momento in cui i fiumi, in modo particolare il Brenta, sfociavano in laguna, i processi di sedimentazione dominavano la sua evoluzione morfologica. I conseguenti interrimenti riducevano i fondali degli specchi d'acqua, favorendo il loro progressivo innalzamento fino a farli emergere e a trasformarli in barene, le quali andavano via via occupando superfici sempre più estese all'interno della laguna.

⁷Nella zona compresa tra il porto di Malamocco e il ponte translagunare si osserva un generale livellamento dei fondali consistente in un vistoso imbonimento dei canali, in un notevole abbassamento dei fondali circostanti e in una totale scomparsa delle ultime ramificazioni dei canali, i ghebi. È quindi in corso un processo di livellamento a una quota intermedia tra quella dei canali e quella dei bassi fondali che sta in gran parte cancellando l'idrografia sommersa.

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

In una lunga fase iniziale, protrattasi fino alla fine dell'Ottocento, l'erosione si è manifestata con processi relativamente lenti a prevalente sviluppo orizzontale. Durante questo periodo, la quantità di sedimenti liberata dalla demolizione progressiva di una parte delle barene, che occupavano grandi superfici, è stata in grado di compensare dinamicamente i fenomeni di erosione in senso verticale, fornendo al sistema i volumi di materiale necessari per permettere ai fondali delle zone d'acqua di conservare sostanzialmente le loro profondità primitive.

In una fase successiva, in pratica a partire dai primi decenni del Novecento, pur continuando i processi di demolizione delle barene con crescente intensità, e quindi i fenomeni erosivi a forte sviluppo orizzontale, i volumi di sedimenti liberati non sono stati più sufficienti per garantire la stabilità dinamica dei fondali. Sollecitati dalle forzanti esterne, i fondali delle zone d'acqua hanno incominciato ad erodersi, incrementando progressivamente le loro profondità, come risulta chiaramente per la parte centrale della laguna.

Questa dinamica evolutiva è confermata dall'analisi puntuale dei rilievi batimetrici disponibili⁸.

La risospensione dei sedimenti dipende in minima parte dalle correnti di marea, che sono responsabili del processo solamente nei grandi canali lagunari, limitatamente peraltro al tratto più prossimo alla bocca. La vera causa della risospensione dai fondali dei sedimenti, nella quasi totalità della laguna, è l'azione del moto ondoso, sia esso generato dal vento o dai natanti in navigazione, capace di risospingere quasi ovunque in modo generalizzato i sedimenti più fini presenti sul fondo. Una volta risospesi, i sedimenti che non hanno modo di ridepositarsi sono trascinati dalle correnti di marea verso i canali e da questi ultimi progressivamente verso le bocche, essendo nei fenomeni di trasporto dominante la fase di riflusso su quella di flusso.

In questo contesto, il comportamento idraulico asimmetrico delle bocche armate assume un ruolo decisivo negli scambi laguna-mare. Nella fase di riflusso, infatti, la corrente in uscita genera un vero e proprio getto tra le dighe, che si proietta compatto in profondità nel mare antistante e trascina con sé i sedimenti trasportati in sospensione, depositandoli lontano dalle testate dei moli. Nella successiva fase di flusso, la corrente è richiamata verso la bocca da tutte le direzioni e solo una minima parte dei sedimenti espulsi in mare durante la fase di riflusso è reintrodotta in laguna, determinando come conseguenza un bilancio negativo negli scambi laguna-mare. Di qui la sistematica perdita netta di sedimenti fini, che da molti anni ormai interessa la laguna ed è alimentata dalla progressiva erosione dei fondali.

Tutto questo avveniva in misura molto contenuta prima della costruzione dei moli alle bocche di porto, quando il comportamento delle bocche stesse in fase di flusso e di riflusso era sostanzialmente

⁸Le mappe storiche, ma soprattutto le carte idrografiche tratte dai rilievi eseguiti nel corso dell'ultimo secolo, evidenziano proprio i due fatti, riguardanti rispettivamente la progressiva riduzione delle superfici che all'interno della laguna sono occupate dalle barene e il generale approfondimento dei suoi fondali. Per quanto riguarda il primo fenomeno si può dire che fino ai primissimi anni del Novecento, il tasso di perdita risulta relativamente moderato e soltanto nel corso di questo secolo si registra un cambiamento significativo con valori corrispondenti a un tasso di erosione annua quasi quadruplicato rispetto a quello dei tre secoli precedenti. Analizzando, invece, l'approfondimento dei fondali si comprende che esso si accentua dopo gli anni trenta, quando la profondità media della laguna centrale passa dai 60 cm del rilievo del 1932, ai 102 cm del 1970, per arrivare ai 146 cm del 2003, a fronte di una profondità media che era di appena 49 cm nel 1901. Mentre per tutto l'Ottocento l'incremento dei fondali è stato di soli 9 cm, negli ultimi 70 anni del Novecento esso è stato di ben 85 cm, quasi dieci volte tanto.

simmetrico e i sedimenti fini, trascinati in mare dalle correnti in uscita, erano nella loro quasi totalità reintrodotti in laguna durante la successiva fase di marea entrante. Si determinavano in tal modo negli scambi laguna-mare condizioni molto più equilibrate di quelle attuali, più favorevoli al mantenimento dei fondali interni, come di fatto è documentato dalla cartografia disponibile.

Le tendenze evolutive innescate dal complesso intreccio di fenomeni naturali e interventi antropici sembrano permanere in un processo di feed-back destinato, a meno che intervengano nuovi fattori, a dare una prevalenza all'azione erosiva delle correnti marine, non più sufficientemente attenuate, e a una dinamica dei sedimenti prevalentemente diretta verso il mare. Il risultato potrebbe essere la graduale cancellazione della morfologia lagunare attraverso un processo erosivo seguito da livellamento delle quote che tenderanno, in generale, verso i valori di 2-2,5 metri, concordemente previsti da alcuni dei modelli di evoluzione a lungo termine messi a punto ultimamente (spiegazione più dettagliata nella sezione 9.2).



Figura 3.2: Mappa della Laguna di Venezia (1556)



Figura 3.3: Mappa della Laguna di Venezia (1763)



Figura 3.4: Carta idrografica della laguna di Venezia (1810)



Figura 3.5: Carta idrografica della laguna di Venezia (1901)



Figura 3.6: Carta idrografica della laguna di Venezia (1932)



Figura 3.7: Carta idrografica della laguna di Venezia (1970)



Figura 3.8: Carta idrografica della laguna di Venezia (2003)

Capitolo 4

PROBLEMA DELL'INQUINAMENTO IN LAGUNA

Le zone costiere sono fondamentali per l'equilibrio della vita nell'intero pianeta, poiché in esse si generano i grandi quantitativi di materia organica che sostengono il corretto assetto della catena alimentare marina. Nonostante queste acque rappresentino meno del 15% della superficie e circa lo 0,5% del volume degli oceani, da esse deriva il 90% delle nostre risorse ittiche. Contemporaneamente, più del 60% della popolazione del pianeta abita territori distanti non più di 60 km dal mare e le attività antropiche determinano rilevanti flussi di inquinanti alle zone costiere.

Queste ultime sono perciò soggette ad una forte pressione, che determina l'instaurarsi di processi di degrado, in termini di riduzione della biodiversità, perdita di habitat, inquinamento delle acque e dei sedimenti, rischi tossicologici, deterioramento del paesaggio. Le zone costiere europee, in particolare, sono a rischio rispetto all'instaurarsi di tali processi per circa l'80% della loro estensione.

La laguna di Venezia non è esente da queste problematiche. In essa il problema dell'inquinamento delle acque è un fenomeno molto complesso dovuto alla molteplicità delle fonti inquinanti e alla peculiarità dell'ambiente. La laguna viene infatti usata come corpo ricevente delle acque di scarico di tutta una serie di attività produttive e insediamenti urbani che ora vengono elencati.

- 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.

La peculiare struttura della città amplifica gli effetti dell'inquinamento urbano sui sedimenti della rete di canali. Dal momento che Venezia non è mai stata dotata di un sistema fognario, un numero elevato di scarichi travasa nei canali le acque reflue di abitazioni, alberghi e attività artigianali, immettendo nel sistema carichi di sostanze nutrienti e inquinanti¹ che sono variabili nel tempo e difficili da stimare.

¹Alcuni inquinanti organici, in special modo le sostanze che richiedono ossigeno, gli oli, i grassi e i solidi vengono rimossi dai trattamenti primari e secondari effettuati sulle acque di scarico. Gli altri, come i sali, i metalli pesanti ed i composti organici refrattari (resistenti alla degradazione), non sono rimossi efficacemente. Uno dei principali problemi riguardanti le acque di scarico è il fango prodotto dal loro processo di trattamento. Questo fango contiene materiale organico, che continua a degradarsi lentamente e composti organici refrattari (che si degradano lentamente

Un altro contributo di inquinanti deriva dal dilavamento delle superfici pavimentate e dai tetti, che si verifica con le precipitazioni. La rete di canali, la cui superficie costituisce non più del 10% dell'intera superficie urbana, raccoglie in questo modo gli inquinanti che provengono dalla deposizione atmosferica, dallo sgretolamento degli edifici e dalla corrosione delle strutture metalliche dell'intera città.

- Le due zone industriali ed il sito energetico di Porto Marghera².
- I comuni dell'entroterra veneto che scaricano le loro acque nei corsi d'acqua scolanti in laguna.

Ogni secondo, infatti, 35 metri cubi di acqua dolce vengono mediamente immessi in laguna dai corsi d'acqua del bacino scolante³ (circa 3 miliardi di litri al giorno). Quest'acqua contiene differenti inquinanti, in differente concentrazione, con differente pericolosità ambientale, trasportati sia nella forma disciolta sia in associazione alle particelle inorganiche ed organiche in sospensione.

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

- I 185000 (circa) ettari di territorio sede di attività agricola con connesso impiego di fertilizzanti organici ed inorganici, pesticidi ecc., le cui acque di scolo confluiscono in laguna attraverso i corsi d'acqua naturali ed i collettori di bonifica.
- Il traffico di natanti e di navi che mettono in laguna i prodotti di scarico derivati dalla combustione incompleta del carburante oltre alle eventuali perdite di idrocarburi.

Inoltre, nelle ore diurne - in particolare la mattina - il traffico determina in alcuni settori della rete importanti processi risospensivi, che possono mettere in gioco, per periodi più o meno brevi, parte degli inquinanti in precedenza depositati sul fondo dei canali.

- Il traffico automobilistico, con un'area di influenza che forse può arrivare in laguna.

Il carico inquinante che deriva da queste fonti è ingente e supera la capacità della laguna di svolgere un processo di rigenerazione delle acque, di rimineralizzazione dei composti organici e di diluizione

o non si degradano affatto).

Particolarmente preoccupanti sono, tra i microinquinanti organici, i più persistenti, chiamati anche con un acronimo inglese POPS (Persistent Organic Pollutants). I sedimenti marini, lacustri e fluviali sono, assieme ai terreni e agli organismi viventi, i comparti ambientali in cui maggiormente si accumulano i POPS.

²Negli anni '60 e '70 c'è stato un elevato impatto sull'ambiente legato alle attività industriali, agricole e allo sviluppo urbano che ha prodotto concentrazioni di metalli pesanti, nutrienti e inquinanti organici nei sedimenti paragonabili a quelli di aree portuali molto inquinate. A partire dagli anni '80 si è assistito ad una riduzione dell'inquinamento dovuta a fattori diversi, quali una diminuzione delle attività industriali, l'introduzione di limiti più restrittivi per gli scarichi idrici nelle acque e controlli più accurati da parte delle autorità.

³Il bacino scolante nella laguna di Venezia è una pianura alluvionale a bassa pendenza, estesa per circa 1850 km² ed incisa da un'intricata rete idrografica di fiumi, canali e scoli. Il 40% della superficie del bacino, soprattutto nel settore meridionale, è costituito da territori di bonifica che giacciono sotto il livello del mare e sono drenati artificialmente.

di quelli inorganici tali da riportare le concentrazioni delle varie sostanze a valori paragonabili a quelli presenti nelle acque marine.

Per questi motivi è di fondamentale importanza poter determinare e analizzare dei parametri idrodinamici che riescano ad indicare in qualche misura la capacità di un bacino di rinnovare le proprie acque. Uno di essi è il coefficiente di dispersione intermareale, parametro statistico che fisicamente rende conto dell'entità della diffusione spaziale di una concentrazione, inizialmente puntiforme, di soluto causata dall'azione idrodinamica di un'onda di marea in un intervallo temporale. L'obiettivo è quindi, come detto nell'introduzione, lo studio della capacità delle correnti, che si sviluppano nel bacino considerato, di strappare e disperdere le particelle del tracciante dalla loro posizione iniziale in modo da mettere in luce la situazione presente con le eventuali zone critiche. Inoltre, l'impiego di questo parametro indicatore, semplice 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 consente di verificare agevolmente l'efficacia degli interventi proposti.

In questo lavoro di tesi il problema della stima dell'efficacia del ricambio idrico nella laguna di Venezia è stato affrontato definendo proprio questo coefficiente per ogni punto del bacino, ricordando che una miglior qualità dell'acqua è presente laddove il coefficiente di dispersione intermareale assume valori più elevati.

Capitolo 5

BASI TEORICHE PER L'APPLICAZIONE DEI MODELLI

5.1 INTRODUZIONE

Simulare il comportamento di un inquinante significa determinare il campo di concentrazione da esso prodotto in qualunque punto dello spazio e in qualunque istante successivo all'emissione.

Per lo studio dei fenomeni di dispersione di inquinanti nella laguna di Venezia si possono impiegare modelli basati sull'equazione di continuità della materia, mettendo in conto le principali cause di dispersione, cioè l'effetto dell'alternanza delle correnti di marea combinato con le caratteristiche morfologiche lagunari.

Essi richiedono come dati di ingresso le caratteristiche del campo di moto ai diversi intervalli temporali di calcolo desumibili da altri modelli di tipo idrodinamico e forniscono l'andamento della concentrazione nello spazio e nel tempo; tuttavia poiché per il raggiungimento di situazioni semistazionarie nei fenomeni di dispersione occorrono, nella laguna, tempi piuttosto lunghi dell'ordine delle settimane e mesi, essi risultano molto onerosi dovendosi integrare le equazioni con passi temporali dell'ordine di una decina di minuti.

Qualora ci si accontenti di conoscere soltanto la situazione media finale caratteristica del regime semipermanente si può fare ricorso a strumenti più semplici ed economici quali appunto possono essere i modelli di dispersione intermareali.

Questi ultimi di contro presentano la difficoltà della quantificazione dei coefficienti di dispersione intermareali, i quali conglobano gli effetti di tutte le cause dispersive in lunghi periodi di tempo e descrivono appunto l'effetto dispersivo della marea su di un soluto rilasciato in zone con acque basse.

Esistono sostanzialmente due modi per simulare la dispersione di inquinanti: l'approccio euleriano e l'approccio lagrangiano.

5.1.1 Metodi di indagine: Euleriano e Lagrangiano

È noto dalla Meccanica Razionale e dall'Idraulica che le proprietà caratterizzanti un campo fluido (densità, velocità, quantità di moto, etc.) possono essere studiate seguendo due metodi di indagine

cinematica: quello (detto euleriano) che si fonda sulla determinazione della velocità e delle sue variazioni in ogni punto del campo di moto e quello proprio della meccanica classica (detto metodo lagrangiano) che si basa sullo studio delle traiettorie delle singole particelle.

Nella trattazione euleriana le proprietà del campo di moto vengono definite in funzione del tempo t e della posizione nello spazio x rispetto ad un sistema cartesiano inerziale di assi x_1, x_2, x_3 . Le variabili (x, t) sono dette euleriane (o spaziali) e caratterizzano una singola posizione dello spazio dove, al variare del tempo, vengono a trovarsi particelle di fluido diverse. L'osservatore è quindi solidale ad un riferimento fisso o inerziale e "fotografa" l'intero campo di velocità (o densità, o pressione,...) a ciascun istante temporale studiando il movimento d'insieme della massa fluida, senza però avere alcuna informazione relativa al moto della singola particella.

L'approccio lagrangiano, d'altra parte, si fonda sul concetto di elemento materiale, ovvero di un volume che si muove con il fluido e, quindi, è sempre costituito dalle stesse particelle liquide. Le proprietà del campo di moto possono allora essere definite in funzione del comportamento dinamico del volume materiale elementare (particella fluida) considerato, individuato tramite la posizione X del suo centro di massa ad un fissato istante iniziale t_0 . Con il trascorrere del tempo tale volume materiale si sposterà e si deformerà, la sua posizione al generico istante t (computato a partire dall'origine dei tempi t_0) essendo definita dalla relazione

$$x = x(X, t)$$

definisce la traiettoria percorsa dalla particella fluida inizialmente posta in X . Quindi l'approccio lagrangiano studia il movimento del fluido lungo ciascuna singola traiettoria ed è evidente che tale modo di procedere equivale ad assumere un sistema di riferimento solidale con il fluido e, pertanto, soggetto ad alterazioni nel corso del movimento.

La variazione nel tempo di una qualsiasi quantità materiale, cioè associata al moto delle particelle, è espressa dalla cosiddetta derivata materiale o totale. Fissata una generica particella, ovvero fissata la sua posizione X all'istante t_0 , un osservatore che si muove solidale con la particella vedrà una qualsiasi proprietà ψ ad essa associata variare non solo perchè varia nel tempo, ma poichè varia anche la posizione $x(X, t)$ descritta dalla traiettoria della particella. Dunque:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial t} + u \cdot \nabla\psi$$

essendo $u = (dx_1/dt, dx_2/dt, dx_3/dt)$ il vettore della velocità euleriana e avendo indicato con ∇ l'operatore gradiente.

Non è corretto affermare, in senso assoluto, che una delle due descrizioni del moto sia migliore dell'altra; è invece giusto osservare che ciascuna possa essere più efficace in un particolare contesto. La descrizione euleriana è senz'altro più utile per descrivere il campo di moto nel suo insieme, ma il riferimento lagrangiano può essere d'aiuto per scrivere equazioni di bilancio di forze su una singola particella.

5.1.1.1 Approcci euleriano e lagrangiano nei modelli di dispersione intermareale

Il tipico approccio euleriano utilizzato nei modelli di dispersione intermareale, volendo risolvere l'equazione del trasporto e diffusione di una sostanza in grandi sistemi mediante tecniche numeriche,

introduce generalmente una dispersione “non autentica” di tipo numerico, maggiore rispetto alla dispersione fisica. Ciò è dovuto al fatto che la discretizzazione spaziale e temporale viene compiuta per assolvere al meglio alle esigenze idrodinamiche del sistema.

L’equazione bidimensionale del trasporto e diffusione è la seguente:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u^T \nabla c = \nabla^T k \nabla c$$

nella quale le variabili sconosciute sono le concentrazioni medie mareali c , mentre il tensore di diffusione k e il vettore delle velocità u sono noti.

Tale approccio risulta poco soddisfacente anche perchè i modelli alle differenze finite, per approssimare l’equazione, spesso non conservano la massa oppure possono introdurre concentrazioni negative nel caso di elevati gradienti di concentrazione.

Invece, un modello lagrangiano intermareale è preferibile quando ci si occupa dei problemi di dispersione in acque basse e lagune. Infatti questo strumento è molto utile nel momento in cui si ha a che fare con sistemi mareali caratterizzati da comportamenti a lungo termine. Le particelle di soluto vengono seguite durante i loro percorsi e i cicli di marea, assumendo che la velocità con cui si muovono sia composta da due termini: la velocità media di trasporto e la fluttuazione casuale della velocità dovuta alla turbolenza. Il gruppo di particelle analizzate è indipendente dalla griglia e i risultati che si ottengono, sfruttando questo metodo, sono più corretti rispetto a quelli derivanti dall’approccio euleriano.

5.2 IL FENOMENO DELLA DISPERSIONE DAL PUNTO DI VISTA LAGRANGIANO

Il modello di avvezione-diffusione di un soluto rilasciato in acqua, utilizzando l’approccio lagrangiano, può essere studiato attraverso il moto Browniano. Quest’ultimo, assieme al processo di Poisson, costituisce uno dei due tipi fondamentali di processi stocastici¹. È possibile descrivere il processo di moto Browniano tramite il “random walk”.

5.2.1 Il “random walk”

Il più semplice random walk può essere descritto come segue. Una particella, nel campo di flusso mareale, posizionata in un certo tempo e luogo, si muove lungo una linea con passi di lunghezza ξ . Ogni passo può essere effettuato verso sinistra o verso destra con probabilità p e $q = 1 - p$ rispettivamente, dove $0 < p < 1$. Si ipotizza che il generico spostamento viene compiuto istantaneamente, ad esempio all’inizio di ogni intervallo di tempo Δt ; si suppone inoltre che le possibili posizioni della particella appartengono all’insieme dei numeri interi. Questo insieme è generalmente

¹Per processo stocastico s’intende un particolare processo seguito da una variabile aleatoria, ovvero una variabile il cui valore cambia nel tempo in maniera incerta. Quando un moto diventa turbolento è privo di senso voler descrivere la sua evoluzione in tutti i dettagli, sia perchè le fluttuazioni avvengono su molteplici scale spaziali e temporali, sia perchè tali fluttuazioni non sembrano possedere nessun tipo di regolarità. L’attenzione viene quindi spostata sulle proprietà del moto medio. Le variabili in un flusso turbolento non sono deterministiche e devono essere trattate come variabili stocastiche.

chiamato “integer lattice” in $R = (-\infty, \infty)$. La particella farà quindi un passo nel “lattice” avanti o indietro e così via fino all’infinito.

Si riporta in grafico la posizione x_t in funzione del tempo.

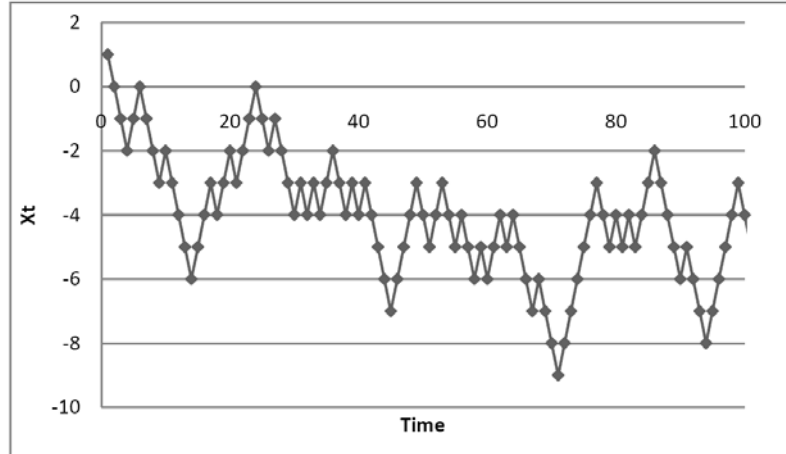


Figura 5.1: Esempio di “random walk”

Il percorso della particella è rappresentato da una spezzata la cui equazione si può esprimere, ponendo:

- x_0 la posizione iniziale;
- ξ_n il generico passo (variabile aleatoria) definito:

$$\xi_n = \begin{cases} +1 & \text{con probabilità } p \\ -1 & \text{con probabilità } q \end{cases}$$

assumendo che la particella ad ogni timestep possa muoversi ± 1 .

La posizione al tempo t (ovvero dopo n passi) sarà quindi:

$$x_t = x_0 + \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n \tag{5.1}$$

Diverse particelle, tutte poste inizialmente in x_0 , si troveranno all’istante t in posizioni x_t generalmente diverse. Il “random walk” è rappresentato dalla sequenza di variabili aleatorie $\{x_t\}$ la quale è un processo stocastico a tempo discreto, cioè in ogni istante l’incremento $(x_{t+\Delta t} - x_t)$ non è influenzato dal passato.

5.2.2 Il moto Browniano

Nel 1975 Robert Brown, osservando delle particelle microscopiche sospese in un liquido, si era accorto che queste erano soggette a numerosi impatti con le altre particelle libere il cui risultato era

un movimento caratterizzato da un percorso irregolare, cioè da traiettorie a zig-zag. La generica particella, in realtà, si muoveva in uno spazio tridimensionale, ma si può pensare di analizzare il fenomeno considerando soltanto la sua proiezione su un asse. Conviene a questo punto introdurre una diversa unità di tempo e di lunghezza per caratterizzare meglio il processo che si vuole indagare.

Ponendo:

- δ la nuova unità di tempo, ovvero il tempo tra due impatti successivi;
- $\sqrt{\delta}$ la dimensione del generico passo;

si ottiene:

$$P(\xi_n = \sqrt{\delta}) = P(\xi_n = -\sqrt{\delta}) = \frac{1}{2}$$

$$\sigma^2(\xi_n) = \frac{1}{2}(\sqrt{\delta})^2 + \frac{1}{2}(-\sqrt{\delta})^2 = \delta$$

Per $x_t = 0$, l'equazione (5.1) può scriversi:

$$x_t = \sum_{n=1}^{\frac{t}{\delta}} \xi_n$$

e se δ è molto più piccolo di t , t/δ è grande e si può pensare di sostituirlo con l'intero più vicino ottenendo:

$$\sigma^2(x_t) = \frac{t}{\delta} \sigma^2(\xi_n) = t$$

Se t è fisso e δ tende a zero, secondo il teorema del limite centrale², x_t ha una distribuzione normale a media nulla. Ciò significa abbandonare lo schema approssimato, nel quale la particella si muove con passi di lunghezza finita pari a $\pm\sqrt{\delta}$ e considerare il processo come continuo.

Questo schema limite è il moto Browniano, detto anche processo di Wiener. Il processo di Wiener è quindi il "limite" di un semplice modello di random walk quando l'ampiezza del passo diventa molto piccola.

Formalmente, allora, si può dire che il moto Browniano è una famiglia di variabili aleatorie $\{x_t\}$, funzione della variabile continua t in $[0, \infty[$ che soddisfa le seguenti condizioni:

1. $x_0 = 0$: la condizione iniziale è fissata;
2. gli incrementi $(x_{t+\Delta t} - x_t)$ in un insieme finito e arbitrario di intervalli disgiunti $(t, t + \Delta t)$ sono variabili casuali indipendenti;
3. per ogni $t \geq 0$ e $\Delta t \geq 0$, $(x_{t+\Delta t} - x_t)$ ha una distribuzione normale a media nulla.

Il processo costruito partendo da un "random walk" simmetrico e facendo il passaggio al limite ha dunque la proprietà (3). La proprietà (2) proviene dal fatto che l'incremento in intervalli disgiunti è ottenuto sommando gli spostamenti ξ_n , quindi le somme sono indipendenti.

²Il teorema del limite centrale, afferma che se si ha una somma di variabili aleatorie indipendenti ed identicamente distribuite con media μ e varianza σ^2 , allora indipendentemente dalla forma distributiva di partenza, al tendere della dimensione campionaria all'infinito la somma tende a distribuirsi come una variabile casuale normale avente valore atteso 0 e varianza 1.

5.2.3 Il processo di dispersione

Indicata con x_t la coordinata di una particella sospesa in un liquido all'istante t , si assume che lo spostamento della particella sia la somma di due componenti: una media prodotta da una velocità macroscopica v e una dovuta alla componente fluttuante della velocità v' . Si suppone inoltre che la componente fluttuante dello spostamento ($v' \cdot \Delta t$) sia una variabile aleatoria la cui distribuzione può dipendere dalla posizione x della particella, dall'istante t nel quale è osservato lo spostamento e dall'intervallo di tempo Δt durante il quale lo spostamento è osservato.

Lo spostamento della generica particella può essere scritto approssimativamente nella forma:

$$x_{t+\Delta t} = x_t + [v(t, x_t) + v'(t, x_t)] \cdot \Delta t$$

Se si fanno muovere delle particelle con questa legge, per Δt che tende a zero, la distribuzione x_t all'istante t è la soluzione dell'equazione del trasporto e dispersione, come risulta dalle considerazioni che seguono.

Vale la seguente definizione:

$$c_{t,x} = \text{prob}(x_t = x)$$

Con riferimento all'esempio semplificato di "random walk" descritto in precedenza, la probabilità che una particella si trovi nella posizione x all'istante $(t + \Delta t)$ può essere scritta come:

$$c_{t+\Delta t,x} = p \cdot c_{t,x-\xi} + q \cdot c_{t,x+\xi} \quad (5.2)$$

Quindi la probabilità per la particella libera di essere nella posizione x all'istante $(t + \Delta t)$ è data dalla somma della probabilità p per una particella in $(x - \xi)$ di muoversi in x , con la probabilità q per la particella in $(x + \xi)$ di muoversi in x .

Sviluppando la $c_{t,x-\xi}$ e la $c_{t,x+\xi}$ in serie di Taylor:

$$c_{t,x-\xi} = c_{t,x} - \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_x \xi + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right|_x \xi^2 + \dots$$

$$c_{t,x+\xi} = c_{t,x} + \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_x \xi + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right|_x \xi^2 + \dots$$

e sostituendo in (5.1) si trova:

$$c_{t+\Delta t,x} = p \cdot \left[c_{t,x} - \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_x \xi + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right|_x \xi^2 \right] + q \cdot \left[c_{t,x} + \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_x \xi + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right|_x \xi^2 \right]$$

ovvero:

$$c_{t+\Delta t,x} - c_{t,x} = -\xi(p-q) \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_x + \xi^2 \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right|_x$$

Dividendo per Δt e facendo il limite per Δt che tende a zero, mantenendo costanti i termini:

$$a = \xi(p-q)/\Delta t \text{ e } b = \xi^2/\Delta t$$

si trova la relazione:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -a \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{1}{2} b \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (5.3)$$

nella quale a rappresenta lo spostamento del centro di massa e b un coefficiente di dispersione.

L'equazione (5.3) è la classica equazione del trasporto e dispersione che può essere ottenuta in modo analogo ipotizzando che il generico passo ξ anzichè valere ± 1 , possa assumere valori qualsiasi caratterizzati da una distribuzione $p(\xi)$.

In questa ipotesi un'equazione analoga alla (5.1) si scrive:

$$c_{t+\Delta t, x} = \int_{-\infty}^{+\infty} c_{t, x-\xi} \cdot p(\xi) d\xi$$

Se sviluppiamo in serie di Taylor il termine $c_{t, x-\xi}$:

$$c_{t, x-\xi} = c_{t, x} - \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_x \xi + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right|_x \xi^2 + \dots$$

e lo sostituiamo nell'equazione precedente si trova:

$$c_{t+\Delta t, x} = c_{t, x} \int_{-\infty}^{+\infty} p(\xi) d\xi - \frac{\partial c}{\partial x} \int_{-\infty}^{+\infty} \xi \cdot p(\xi) d\xi + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \xi^2 \cdot p(\xi) d\xi$$

ovvero:

$$c_{t+\Delta t, x} - c_{t, x} = -\frac{\partial c}{\partial x} \cdot \bar{\xi} + \frac{1}{2} \sigma_{\xi}^2 \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Per un Δ piccolo, si può scrivere:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial c}{\partial x} \cdot v + \frac{1}{2} \frac{\sigma_{\xi}^2}{\Delta t} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

dove:

v rappresenta il rapporto tra lo spostamento medio $\bar{\xi}$ e il Δt ;

σ_{ξ}^2 è lo scarto quadratico dello spostamento rispetto al valore medio.

Se si pone:

$$D = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{\xi}^2}{\Delta t} \quad (5.4)$$

l'equazione

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial c}{\partial x} \cdot v + D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

rappresenta la classica equazione del trasporto e dispersione (per il caso monodimensionale) nella quale D è il coefficiente di dispersione.

Essendo c la probabilità che una particella si trovi in una prefissata posizione x_t , in qualche modo essa rappresenta il numero medio di particelle che si trovano in un intorno di x_t e quindi la concentrazione di particelle in questa posizione.

Essendo $\Xi = v' \cdot \Delta t$, l'equazione (5.4) può essere scritta:

$$D = \frac{1}{2} \sigma_{v'}^2 \cdot \Delta t \quad (5.5)$$

Quindi facendo spostare una particella con una velocità media v e una componente fluttuante v' che rispetta l'equazione (5.5), si ottiene una soluzione lagrangiana dell'equazione del trasporto e dispersione.

Si osserva anche qui come il fenomeno della dispersione debba essere trattato ad una scala temporale diversa da quella del moto medio; infatti se si considerano le quantità σ_{Ξ}^2 e σ_v^2 finite, al tendere di Δt a zero, dalle equazioni (5.4) e (5.5) si ottengono coefficienti di dispersione che assumono valore ∞ e 0 rispettivamente e solo ipotizzando che la componente causale dello spostamento sia un infinitesimo di ordine $\sqrt{\Delta t}$ si ottengono soluzioni coincidenti e finite.

5.3 IL MODELLO DISPERSIVO INTERMAREALE SECONDO L'APPROCCIO LAGRANGIANO

Un modello di questo tipo segue nello spazio e nel tempo una particella di fluido caratterizzata da una massa unitaria di sostanza conservativa. Questa si sposta con una velocità w somma del termine mediato sulla turbolenza $W(x, t)$ e del termine fluttuante $w'(x, t)$. È valida quindi la seguente relazione che fornisce nel tempo la posizione della particella:

$$\frac{dx}{dt} = W(x, t) + w'(x, t) \quad (5.6)$$

la velocità locale ed istantanea $W(x, t)$ viene determinata mediante un modello *Idrodinamico*, mentre per la valutazione della fluttuazione di velocità $w'(x, t)$ (che dipende dalla viscosità cinematica turbolenta, la quale coincide con il coefficiente di dispersione locale ed istantaneo) si fa ricorso alla teoria degli spostamenti aleatori secondo la quale $w'(x, t)$ può essere generata in modo casuale a partire da una distribuzione di densità approssimabile mediante una gaussiana bivariata le cui caratteristiche sono strettamente legate al tensore della dispersione D .

In pratica si immettono all'istante t_0 un certo numero di particelle nella posizione x_0 , al tempo $t_1 = \Delta t + t_0$ si osserverà una nuvola di particelle il cui centro di massa si troverà nella posizione x_1 mentre la "dispersione" dei punti intorno x_1 è strettamente legata al tensore di dispersione medio incontrato dalle particelle.

L'integrazione dell'equazione (5.6) operata su un periodo di marea T , tra gli istanti t_0 e $T + t_0$, costituisce il modello dispersivo lagrangiano intermareale: un impulso di concentrazione, ovvero la massa di sostanza conservativa (il centro di massa), che all'istante t_0 si trova nella posizione x_0 , all'istante $T + t_0$ si troverà nella posizione $x_T = x_0 + W_{RC}(\tau_0)T$ e avrà subito una dispersione dipendente da $D_T(\tau_0)$ essendo $W_{RC}(\tau_0)$ e $D_T(\tau_0)$ rispettivamente la velocità residua lagrangiana del centro di massa in un ciclo di marea e il tensore della dispersione, entrambi dipendenti dalla fase della marea $\tau_0 = t_0 - \text{int}(t_0/T) \cdot T$.

In ogni punto del campo di moto è quindi possibile definire la trasformazione che una massa puntuale unitaria subisce in un periodo di marea. Tale funzione di trasferimento oltre a dipendere

dalla posizione, come si è visto, viene a dipendere anche dalla fase della marea τ_0 che può essere assimilata ad una proprietà invariante della sostanza immessa: ogni particella è così caratterizzata da una massa e dall'istante di immissione, ovvero dalla fase.

Data l'assenza dell'interazione tra le particelle, l'integrazione nel tempo (che avanza a passi temporali di un periodo di marea) si ottiene come convoluzione nello spazio tra la distribuzione di concentrazione al passo temporale precedente e le funzioni di trasferimento locali. Questo procedimento presenta non pochi vantaggi legati alla sovrapposibilità degli effetti.

Il problema più serio è determinato dal fatto che velocità residua e tensore della dispersione dipendono entrambi dalla fase, mentre un secondo problema riguarda le capacità degli usuali modelli bidimensionali impiegati per lo studio dell'idrodinamica di bacini soggetti a marea di descrivere il campo cinematico con un'accuratezza sufficiente per la soluzione di problemi di trasporto e di dispersione nei quali, certamente, almeno la componente di trasporto richiede precisioni di ordine superiore.

5.3.1 Analisi delle principali caratteristiche cinematiche: le velocità residue

Generalmente si definisce velocità residua lagrangiana il rapporto tra lo spostamento subito da una particella durante un ciclo di marea e il periodo T :

$$w_R = \frac{x_T - x_0}{T} \quad (5.7)$$

tale definizione è sempre vera, ma è certamente soddisfacente nell'ipotesi di assenza di fenomeni di dispersione. In presenza di dispersione si potrebbe pensare di definire la velocità residua con riferimento allo spostamento del centro di massa di una macchia di inquinante che all'istante t_0 è concentrata in un punto del campo di moto:

$$W_{RC} = \frac{x_{cT} - x_0}{T} \quad (5.8)$$

Solo se il campo di moto interessato dalla macchia durante la sua evoluzione mareale è caratterizzato da velocità medie $W(t)$ dipendenti esclusivamente dal tempo (omogeneità spaziale) e la dispersione è nulla, allora lo spostamento del centro di massa coincide con la corrispondente traiettoria di una particella che si muove con velocità $W(t)$. In tal caso tutte le particelle, compreso il centro di massa, hanno la stessa traiettoria e lo spostamento residuo si ottiene attraverso l'integrazione dell'equazione (5.6) nella quale siano trascurate le fluttuazioni di velocità.

Diversamente, se il campo è omogeneo ma è presente anche la dispersione, le particelle avranno tutte un'uguale velocità e in aggiunta ad essa possiederanno anche una fluttuazione mediamente nulla. In questa situazione la velocità residua definita attraverso l'equazione (5.8) viene a dipendere dalla dispersione in quanto lo spostamento del centro di massa è determinato, istante per istante, dalla velocità media pesata $W_C(t)$ così espressa:

$$W_C(t) = \iint_{\text{dominio}} W(x, t) \cdot C \quad (5.9)$$

in cui C è la distribuzione di probabilità istantanea di trovare una particella, ovvero la distribuzione spaziale di concentrazione di una massa unitaria. La differenza tra la velocità media di tutte le particelle W_C e la velocità istante per istante del fluido nel centro di massa $W(x_C)$ è l'effetto prodotto dalla dispersione. Questo fatto, ovviamente, costituisce un'ulteriore complicazione del problema determinata, ancora una volta, dall'eterogeneità spaziale al crescere della quale presumibilmente cresce anche la differenza tra le velocità residue w_R e W_{R_C} .

5.3.2 Analisi delle principali caratteristiche cinematiche: la dispersione

Una semplificazione che molte volte risulta accettabile consiste nel trascurare l'effetto sulla dispersione turbolenta dovuto ai termini di accelerazione temporale, e considerare la dispersione turbolenta agente solo nella direzione istantanea della velocità trascurando così la dispersione trasversale.

Passando da un moto unidimensionale ad un moto bidimensionale si osservano due effetti.

Il primo è causato dalla non uniforme velocità cui è soggetto il centro di massa di una macchia durante il suo spostamento; in particolare, non essendo costante la direzione del vettore velocità, si ha la tendenza ad una minore anisotropia della dispersione in quanto la dispersione agisce in direzioni diverse.

Il secondo effetto è prodotto dalla non uniforme distribuzione delle velocità nello spazio così che punti diversi di una macchia sono soggetti a diversa convezione e dispersione.

In un moto permanente tale distinzione è peraltro priva di significato in quanto i due effetti risultano invarianti e nel loro complesso indicano sostanzialmente una non uniforme distribuzione dei coefficienti di dispersione e la necessità di descrivere gli stessi mediante un tensore dipendente dallo spazio.

Quando si considera un moto "quasi periodico", come è quello indotto dalla marea, l'evidenziare le diverse componenti e la loro importanza relativa è utile nello stabilire se e quali possono essere le semplificazioni da introdurre.

Si possono evidenziare le seguenti componenti di dispersione:

- dispersione turbolenta che risulta ovviamente indipendente dalla fase;
- dispersione dovuta alle oscillazioni di marea e alla corrente residua, dipendente dalla fase, che a sua volta può essere scomposta in due termini: il primo relativo al centro di massa e cioè al percorso compiuto da una particella che non subisce dispersione turbolenta durante il suo moto, il secondo, invece, rappresentato dall'effetto prodotto dalla turbolenza e dalla non uniforme distribuzione spaziale delle velocità.

5.3.2.1 Il coefficiente di dispersione intermareale

Il coefficiente di dispersione intermareale D associa ad ogni punto del dominio un valore numerico che riassume in modo immediato la capacità di dispersione di un'ipotetica concentrazione di soluto che in tale punto viene rilasciata, fornendo uno strumento utile per la valutazione del ricambio idrico nel bacino.

Questo coefficiente di dispersione intermareale ha una valenza prettamente statistica, in cui la variabile è rappresentata dalla posizione assunta nel tempo da tutte le particelle che compongono una macchia, come è immediato riscontrare nella sua formulazione analitica:

$$D = \frac{1}{4} \frac{\Delta\sigma^2}{T} \quad (5.10)$$

σ rappresenta lo scarto quadratico medio della distribuzione della posizione (distanza lineare) delle particelle rispetto al baricentro della macchia. Il Δ indica che il numeratore è calcolato come differenza tra i quadrati degli SQM calcolati in due istanti diversi del processo dispersivo prodotto dal passaggio dell'onda di marea e, in particolare, tra l'istante $t = 0$ e $t = 12$ ore, separati tra loro da un intervallo temporale T pari al periodo (12 ore = 43200 s).

È evidente l'interpretazione fisica di D che rappresenta semplicemente la velocità di dispersione nel tempo (misurata in m^2/s) delle particelle, infatti macchie che si diffondono più facilmente hanno un valore più alto del coefficiente piuttosto che le particelle che risultano intrappolate nel sistema e non possono diffondersi.

Gli estremi temporali per il calcolo di D sono identificati con gli estremi del primo periodo di simulazione: la scelta risponde alla necessità di assicurare che il parametro D ottenuto sia effettivamente rappresentativo di un punto o, per venire incontro alle esigenze di un calcolo discreto e alla volontà di una riproduzione realistica degli eventi (un'eventuale immissione di sostanze solubili non può concretamente avvenire in modo strettamente puntuale), di una zona comunque limitata. Se si facesse riferimento a periodi successivi, per i quali le condizioni di partenza vedono una macchia già abbondantemente dispersa su una superficie più o meno estesa, difficilmente si potrebbe sostenere che il parametro calcolato possa essere rappresentativo di un punto preciso.

Il fatto di limitare a un periodo l'intervallo di calcolo risponde invece ad un'esigenza di altra natura: come già accennato, al processo di dispersione "pura" si sovrappone l'effetto delle *velocità residue* che rappresentano quelle componenti di velocità responsabili degli spostamenti residui che si maturano nel corso di un periodo completo e portano il baricentro delle macchie, a distanza di 12 ore, a non recuperare esattamente la posizione precedentemente assunta. La necessità di limitare l'influenza di questo fenomeno "collaterale", che su tempi più lunghi assume evidentemente maggiore importanza, è alla base di questa scelta.

Si può anche dire che questo coefficiente (D) prende in considerazione gli effetti della dispersione in entrambe le direzioni x e y , risultando un coefficiente isotropico. Però in ambienti molto complessi, come la laguna di Venezia, questa assunzione non è sempre valida.

Capitolo 6

IL MODELLO IDRODINAMICO

Per l'analisi della dispersione intermarerale e 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.

Il modello bidimensionale agli elementi finiti (WWTM), che implementa la soluzione discreta del sistema di equazioni differenziali che governa il problema, così come il modello *Lagrangiano* che simula la dispersione, sono stati sviluppati internamente al dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA) dell'Università di Padova.

Il modello *Idrodinamico* richiede 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, e anche di un file *.sim* con indicazioni sulle condizioni al contorno che caratterizzano il problema che si intende studiare e altre istruzioni sulle modalità di calcolo da adottare.

Si utilizza il programma *Incidenze*¹, il quale consente la visualizzazione e l'elaborazione dei dati e dei risultati relativi alle simulazioni effettuate con il modello *Idrodinamico*. Questo programma

¹Con *Incidenze* si possono predisporre i dati in ingresso del modello matematico ed elaborare e visualizzare i risultati delle simulazioni. In particolare è possibile costruire il reticolo di calcolo e assegnare al modello le condizioni al contorno per le simulazioni:

- ◊ inserendo, eliminando o modificando le componenti del reticolo, ovvero i nodi, gli elementi bidimensionali (maglie), gli elementi monodimensionali (canali), i tronchi speciali (soglie, condotte, paratoie, idrovore);
- ◊ visualizzando le diverse tipologie di condizioni al contorno per le simulazioni;
- ◊ visualizzando elementi grafici di base georeferenziati, quali dati vettoriali derivati da files in formato *.DXF* o *.SHP*, immagini raster, punti 3D in formato ASCII;
- ◊ costruendo automaticamente la triangolazione ad elementi finiti a partire da punti sparsi o da poligoni georeferenziati;
- ◊ calcolando le quote da attribuire alle celle triangolari sulla base di procedure di interpolazione a partire da punti sparsi o da poligoni georeferenziati.

È possibile, inoltre, caricare e rappresentare graficamente i files di output risultanti dalle elaborazioni del modello bidimensionale. In particolare, è possibile:

- ◊ visualizzare in forma di mappe a colori i valori nodali o di maglia dei parametri calcolati con il modello (livello, tirante, velocità, sforzo al fondo, energia, numero di Froude, franchi arginali);
- ◊ visualizzare in forma di vettori la velocità e la direzione della corrente;
- ◊ analizzare la simulazione modificando l'istante di visualizzazione passo-passo o secondo una sequenza animata;
- ◊ visualizzare i risultati in forma di diagrammi sia come andamento temporale dei parametri sia come profili longitudinali.

Le immagini visualizzate possono essere stampate o esportate in files grafici di formato standard (ASCII, *.DXF*, *.SHP*, *.BMP*). Le animazioni possono essere esportate come filmato in formato *.AVI* oppure come sequenza di file.

è costruito in forma di software interattivo a finestre e fornisce gli strumenti per la generazione, la visualizzazione e la modifica del reticolo di calcolo. Esso consente inoltre di visualizzare il file delle condizioni al contorno delle simulazioni (.sim) e il risultato delle stesse (.out), rappresentando graficamente i parametri idrodinamici forniti dal modello, quali livelli, tiranti, portate, velocità, sforzi al fondo, ecc. Le rappresentazioni grafiche possibili includono diagrammi con andamento temporale dei parametri, profili longitudinali, mappe a colori e sequenze animate. Come si vedrà, lo stesso programma fornisce supporto grafico anche per la lettura delle simulazioni di dispersione dei soluti, contenute nei corrispondenti file .trk.

In questo capitolo si compie una descrizione più accurata di alcuni elementi qui citati con riferimento alle specifiche modalità di creazione/compilazione dei files, adottate per riprodurre il fenomeno mareale e una veloce presentazione delle condizioni idrauliche che conseguentemente si vengono ad instaurare nella laguna e dalle quali si parte per studiare il fenomeno dispersivo.

6.1 IL DOMINIO DI CALCOLO (file .geo²)

Come già anticipato il file .geo utilizzato in questo lavoro, fornito dal dipartimento ICEA della Università di Padova, contiene il modello virtuale della laguna di Venezia dei primi anni del '900, precisamente del 1901, ricostruita con l'intento di riprodurre tutte le caratteristiche geometriche e fisiche invarianti considerate rilevanti ai fini dello studio.

La costruzione del dominio prevede innanzitutto la definizione planimetrica dell'area di interesse attraverso la riproduzione dei confini della stessa, dei contorni dei bacini idrici e degli elementi più significativi del paesaggio. Al fine di ottenere una rappresentazione quanto più possibile aderente alla realtà, in questa fase ci si affida spesso 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 prevede la creazione degli elementi mono-dimensionali (nodi) e bidimensionali (maglie triangolari) che formano la cosiddetta *mesh*, su cui applicare le equazioni del sistema che descrive il problema idraulico; tale operazione è affidata al software *Incidenze* che opera in modo automatico sulla base delle poche istruzioni fondamentali. La possibilità di controllare il passo di discretizzazione (ovvero la dimensione media del lato delle maglie) consente di rappresentare in modo diverso parti diverse del dominio, affinando la mesh solo nelle zone in cui si prevede effettiva necessità di una maggiore accuratezza di calcolo, in modo da ottimizzare il carico computazionale richiesto dal modello.

²Nel file della geometria sono contenute le coordinate dei nodi del reticolo e le incidenze (connessioni nodali) delle maglie, dei canali e dei tronchi speciali. Sono contenute, inoltre, le proprietà di ciascun elemento (nodi, maglie, canali e tronchi speciali).

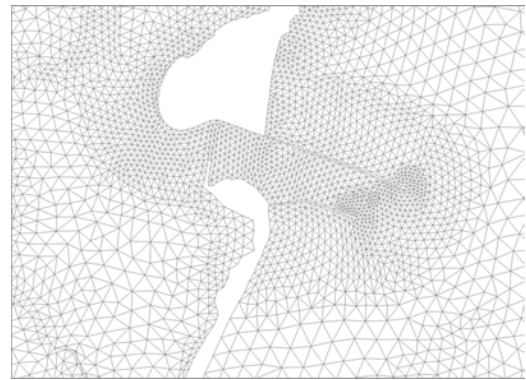
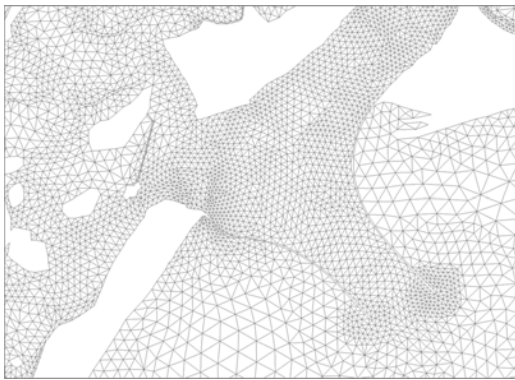
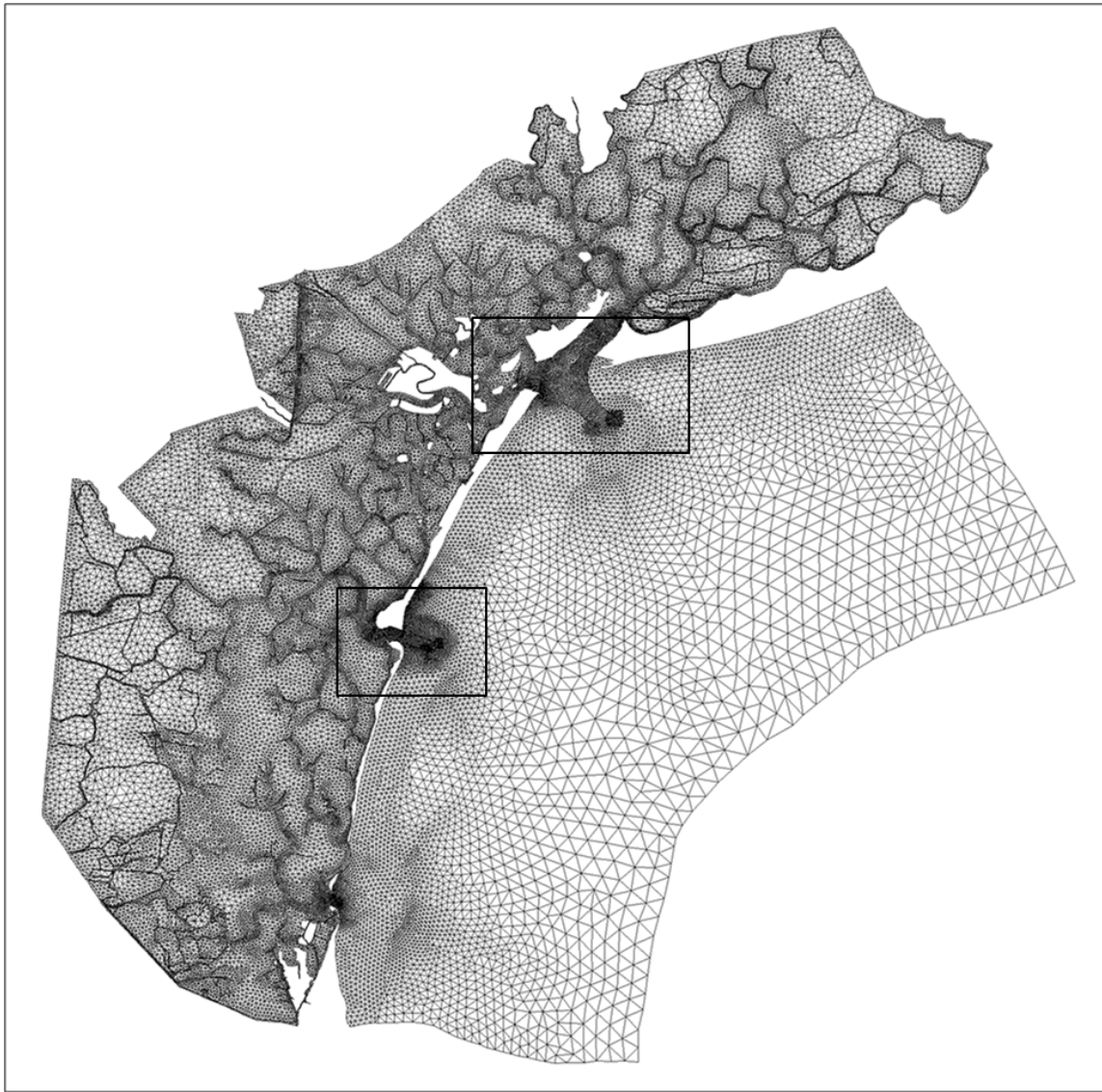


Figura 6.1: Dominio di calcolo e affinamento della mesh (bocca di Lido e di Malamocco)

La figura 6.1 rappresenta il dominio di calcolo utilizzato, costituito da 80409 maglie triangolari e da 41731 nodi. Esso include una buona porzione di tratto costiero allo scopo di poter applicare correttamente le condizioni al contorno, le tre bocche di Lido, Malamocco e Chioggia e i territori lagunari che da esse si estendono fino alle zone più interne della laguna caratterizzate dalla presenza delle barene.

I riquadri, inseriti nel dominio di calcolo e riproposti subito dopo ingranditi, mettono in evidenza due particolari, rispettivamente la bocca di Lido e di Malamocco. Da questi dettagli è possibile osservare il grado d'affinamento della mesh, molto più spinto per la rappresentazione dell'ingresso in laguna, dove si attendono più intensi gradienti di velocità e dove, quindi, un maggiore dettaglio equivale ad un sensibile miglioramento nella stima delle caratteristiche del moto. Il grado d'affinamento è, invece, meno elevato per le maglie poste in mare aperto e nella parte più interna del bacino dove ci si aspettano variazioni più graduali delle condizioni di moto.

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

- la quota del fondo (h_f) rispetto al livello medio del mare: rappresenta il valore medio della maglia, cioè la quota del suo baricentro;
- il valore del coefficiente di Gauckler-Strickler (k_s): interviene nelle equazioni risolutive del problema e rende conto della resistenza al moto introdotta dalla scabrezza del fondo;
- il valore delle asperità del fondo (a_r): questo parametro non riveste un vero e proprio significato fisico ma è utilizzato per il calcolo di una funzione accessoria che permette di discriminare il passaggio dalla condizione di “maglia asciutta” alla condizione di “maglia sommersa”. È un fenomeno di discontinuità che le sole equazioni del moto fluido non permettono di gestire.

Nell'immagine 6.2 è descritta la batimetria della laguna di Venezia. I valori di h_f sono espressi in metri sopra il livello medio mare ed evidenziano immediatamente le caratteristiche della laguna: dalle tre bocche si snodano e si ramificano sempre più i tre profondi canali spingendosi nelle aree più interne del bacino caratterizzate dalla presenza di molte terre emerse.

La laguna può essere suddivisa principalmente in tre zone che si possono chiamare “laguna superiore”, “laguna centrale” e “laguna inferiore”, influenzate dalle rispettive bocche.

Nella laguna di Venezia le irregolarità del fondo sono predominanti e influenzano l'idrodinamica dei flussi di marea: infatti spostandosi dalle tre bocche lagunari verso i confini interni del bacino, la profondità diminuisce influenzando la propagazione dell'onda di marea nel sistema. Il colore rosso cupo evidenzia le aree più alte della laguna, le quali vengono allagate soltanto quando è presente l'alta marea. Queste zone, come rappresentato nella figura 6.2, sono principalmente situate nella laguna superiore e sul lato ovest della laguna centrale-inferiore. Le superfici caratterizzate da una colorazione giallo-verde, invece, aventi una profondità variabile tra $-1 \div -2.25$ metri sul livello medio del mare, emergono durante la fase di riflusso della marea. Dalla batimetria studiata, relativa alla situazione lagunare del 1901, si può notare come queste aree siano poco estese e si sviluppino in principal modo nella laguna centrale.

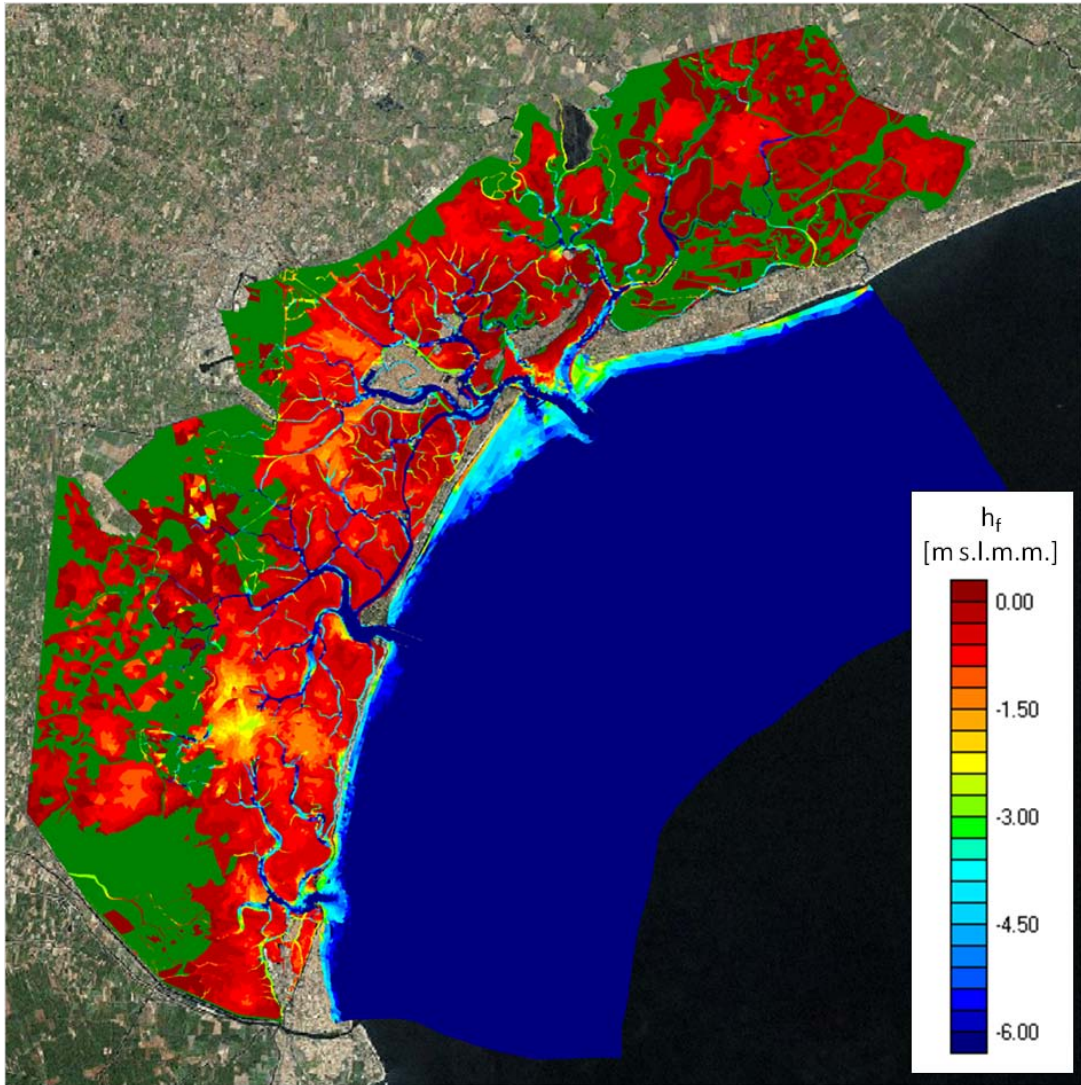


Figura 6.2: Quote del fondo della laguna di Venezia (m s.l.m.m.)

Nella figura 6.2, come succederà anche in seguito, il dominio virtuale costruito con *Incidenze* è sovrapposto ad una rappresentazione del territorio ottenuta tramite ortofoto scattate da aereo: entrambi gli elementi sono georeferenziati secondo il sistema di riferimento Gauss-Boaga consentendo una perfetta sovrapposizione delle immagini. Inoltre è stato inserito il .cnt³ contenente i poligoni che individuano le superfici, della laguna di Venezia, con quote del fondo superiori a 0.25 metri sul livello del mare (le barene, caratterizzate, in questa e nelle prossime figure, dal colore verde).

Allo scopo di dare una maggiore evidenza ai gradienti di profondità che si realizzano nell'interno dell'area lagunare, si è imposto il valore minimo di -6 metri alla scala di rappresentazione cromatica

³File vettoriale costituito da poligoni, i cui vertici possono essere caratterizzati anche da una coordinata z. Tali poligoni possono essere utilizzati per rappresentare graficamente i contorni del reticolo di calcolo, per costituire la base per la costruzione automatica della triangolazione, per definire o delimitare aree sulle quali eseguire delle operazioni sui dati, per tracciare sezioni o profili lungo i quali estrarre i dati delle simulazioni.

rinunciando alla descrizione delle aree con profondità maggiore. Tale valore viene superato soltanto lungo i canali principali e in mare aperto dove, spingendosi verso il largo, il fondale declina fino a raggiungere circa i 20 metri di profondità ai confini del dominio.

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

$$k_s = 40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1} \text{ in mare aperto};$$

$$k_s = 35 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1} \text{ nei canali principali};$$

$$k_s = 30 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1} \text{ in alcune aree della laguna centrale};$$

$$k_s = 20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1} \text{ in gran parte del bacino centrale e inferiore};$$

$k_s = 15 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ in corrispondenza delle barene, quindi nella laguna superiore e sul lato ovest della laguna centrale-inferiore.

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

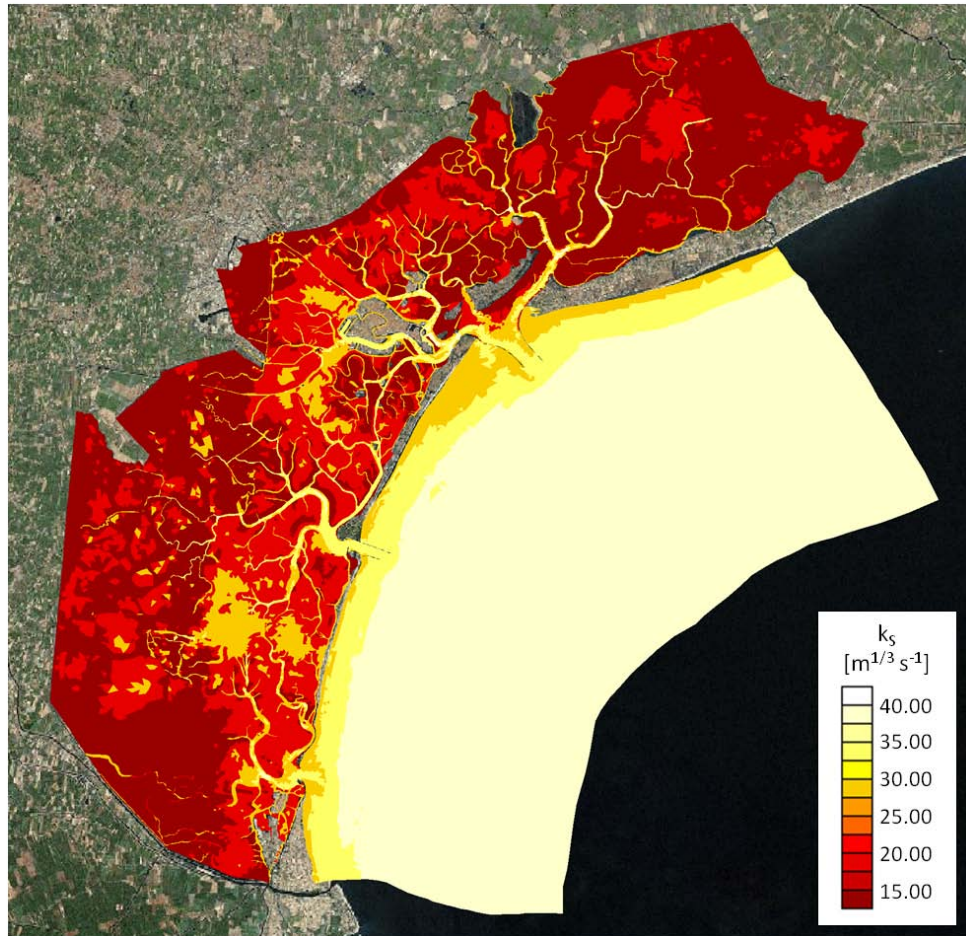


Figura 6.3: Distribuzione del coefficiente di Gauckler-Strickler nella laguna di Venezia ($m^{1/3} s^{-1}$)

Il parametro a_r è posto costante, pari a 0.5 per tutti gli elementi triangolari.

6.2 CONDIZIONI AL CONTORNO E ISTRUZIONI DI CALCOLO (file .sim)

Il file .sim, assieme al file .geo, costituiscono l'input per il modello di calcolo. Si tratta di un semplice file di testo attraverso il quale, rispettando una prestabilita formattazione, è possibile impartire istruzioni al software circa le modalità di calcolo e le condizioni al contorno da imporre al problema.

Di seguito si descrive la struttura e, nei suoi tratti fondamentali, la modalità di compilazione di questo file, riportato per riscontro anche in figura 6.6 (per snellirne lo sviluppo, senza comprometterne la leggibilità, la lunga lista di “nodi con livello assegnato” è stata “tagliata”).

Il documento di testo si articola nei seguenti gruppi di dati:

- i dati generali della simulazione nei quali si definiscono, innanzitutto, il passo temporale di stampa dei risultati espresso in secondi (dt) e la possibilità o meno di poterlo visualizzare sul video (1/0). Si stabilisce se verranno considerati anche i termini convettivi e quelli di Reynolds con i rispettivi ritardi (in questa situazione è prevista anche la loro presenza) e si fissa il valore del parametro di Coriolis. È richiesta, poi, l'indicazione del nome del file .geo su cui operare la simulazione e del file .out che conterrà i risultati; infine si inserisce la durata della simulazione e il passo temporale di integrazione, entrambi espressi in secondi.
- Le condizioni iniziali tra le quali è possibile definire un livello iniziale (rispetto al livello medio mare, espresso in metri) del bacino, così come caricare i risultati di una precedente simulazione da utilizzare come condizioni di partenza. In quest'ultimo caso è necessario indicare il nome del file .bup che contiene tali informazioni (questo file viene creato automaticamente al termine di ogni simulazione assieme al file .out).
- Le tabelle dei dati variabili nel tempo, a passo temporale costante. Si riportano nel .sim i parametri (livello, portata o scala delle portate,..) per i quali, a seconda del problema trattato, risulta necessario imporre condizioni al contorno sui nodi di confine del dominio. È necessario stabilire il numero delle tabelle che si andranno ad inserire (prima riga), quindi si definisce il passo temporale di lettura dei valori della prima tabella, il numero totale di parametri in essa contenuti e un nome per la stessa (seconda riga), infine si inseriscono in sequenza tutti i valori separati da spaziatura. Si ripete il procedimento per ogni tabella prevista.
- Le condizioni al contorno. Vengono indicati, a questo punto, i nodi del dominio di calcolo, così come numerati nel file .geo, sui quali applicare le condizioni al contorno definite dalle tabelle del punto precedente. Si procede immettendo il numero complessivo di nodi associati ad una determinata tabella/condizione al contorno (prima riga), quindi, su colonne separate, il numero identificativo del nodo e il numero identificativo della tabella associata. Si compiono questi passaggi per ciascuna tabella precedentemente definita.

A seguire, il file .sim permette di gestire altri fenomeni quali, l'azione del vento, il trasporto solido, dei quali tuttavia non ci si occuperà nel presente studio.

Per il caso in questione è stata eseguita una simulazione di durata complessiva pari a 172800 secondi, che corrispondono a 48 ore, per un totale di quattro cicli completi di marea da 12 ore

ciascuno, in modo tale che l'idrodinamica corrispondente agli ultimi due cicli di marea (sui quali, come si vedrà, si basa il calcolo della dispersione intermareale) sia rappresentativa di una condizione “a regime”, di completo sviluppo e raggiunta stabilità negli scambi idrici tra laguna e mare Adriatico. È stato utilizzato un passo temporale di calcolo di 1 secondo mentre la frequenza di stampa delle variabili si è posta pari a 1800 secondi, reputata corretta per una buona rappresentazione del fenomeno in fase di lettura dei risultati.

Come condizione iniziale si è attribuito al dominio un livello liquido di 3 cm: tale valore non corrisponde a nessuna condizione che si venga effettivamente a creare in laguna, dove in realtà il livello a riposo è evidentemente nullo, ma è stato imposto al solo scopo di verificare la capacità del modello di riassorbire velocemente condizioni di non-equilibrio; si vedrà in effetti come già dalla metà del primo periodo non se ne conservi più traccia.

Per simulare l'onda di marea si è scelto di imporre un livello variabile nel tempo sui nodi di confine del dominio lato mare, secondo l'andamento sinusoidale riportato in figura 6.4 per i quattro cicli di marea. Operativamente il fenomeno, della durata di 48 ore, è stato descritto con un totale di 97 valori di input aggiornati ad un passo temporale di 1800 secondi (mezz'ora); il primo valore della tabella si intende applicato al tempo $t = 0$ s. L'equazione che rappresenta il fenomeno è la seguente:

$$h = l_m + A \cdot \sin\left(\frac{t \cdot 2\pi}{T}\right)$$

dove:

h = livello dell'acqua (m)

l_m = livello medio dell'acqua (m) = 0

A = ampiezza dell'onda = 0.5 m

t = timestep = 1800 s

T = periodo della marea semi-diurno $\cong 12$ h

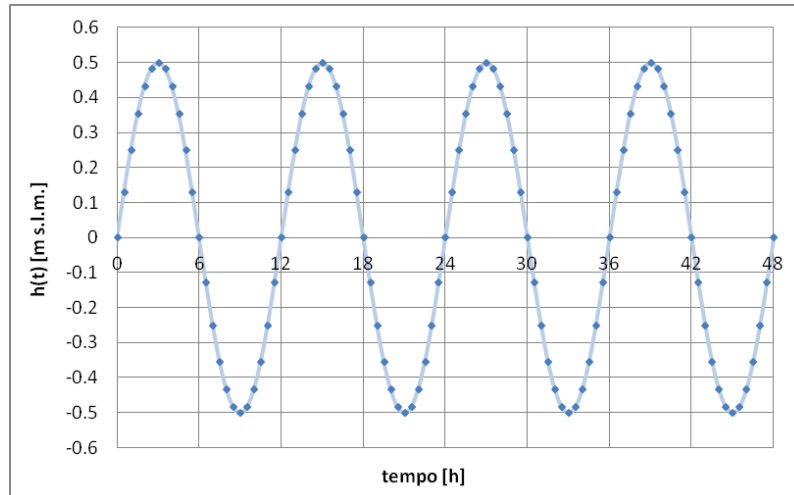


Figura 6.4: Andamento dei livelli imposti sul contorno del dominio

In figura 6.5 sono invece evidenziati i 102 nodi sul lato mare sui quali è stata imposta la condizione al contorno sopra descritta. Questa immagine è stata ottenuta in *Incidenze* attivando il comando “*proprietà sim*” 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.

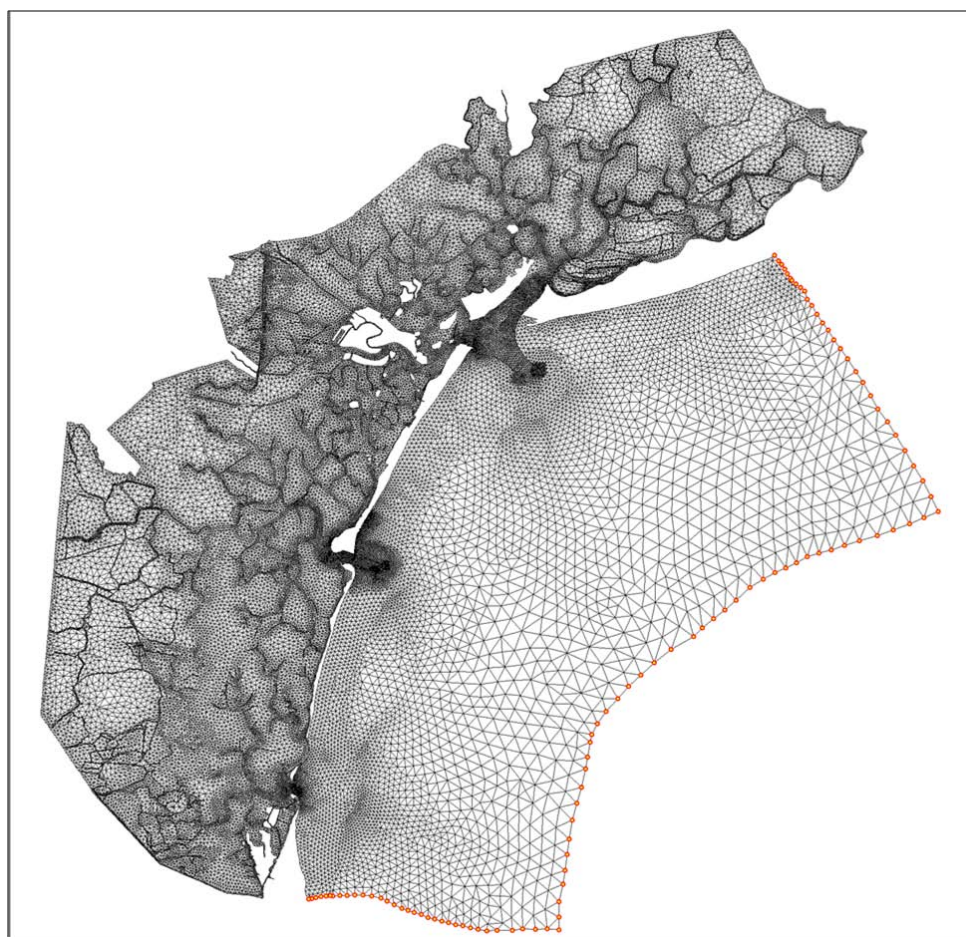


Figura 6.5: Nodi del dominio con livelli imposti nel tempo

```

dt stampa, stampa video(1/0), term convettivi(1/0), ritardo Convettivi, term Reynolds(1/0), ritardo Reynolds, coriolis Par (2*wsinLAT)
1800. 1 1 1800. 1 1800. 0.0 (coriolis a VENEZIA)
Laguna1901.geo nome file geo
Laguna1901_IDRO.out nome file out IDRODINAMICO
Laguna2003NEW_MO.out nome file out MOTO ONDOSO
simulazione marea
172800. 1.0000 !durata, timestep
0 condizioni iniziali IDRODINAMICA (0=livello_costante; 1=file_restart)
0.030 valore iniziale delle quote nodali
xxxIDRO.rts file di restart
1, tabelle per l'assegnazione di livelli, portate, vento e concentrazione
1800. 97 tabella_1_livellimarea_PiattaformaCNR(msmm)
0.000 0.130 0.250 0.354 0.433 0.483 0.500 0.483 0.433 0.354
0.250 0.129 0.000 -0.129 -0.250 -0.354 -0.433 -0.483 -0.500 -0.483
-0.433 -0.354 -0.250 -0.129 0.000 0.129 0.250 0.354 0.433 0.483
0.500 0.483 0.433 0.354 0.250 0.129 0.000 -0.129 -0.250 -0.354
-0.433 -0.483 -0.500 -0.483 -0.433 -0.354 -0.250 -0.129 0.000 0.129
0.250 0.354 0.433 0.483 0.500 0.483 0.433 0.354 0.250 0.129
0.000 -0.129 -0.250 -0.354 -0.433 -0.483 -0.500 -0.483 -0.433 -0.354
-0.250 -0.129 0.000 0.129 0.250 0.354 0.433 0.483 0.500 0.483
0.433 0.354 0.250 0.129 0.000 -0.129 -0.250 -0.354 -0.433 -0.483
-0.500 -0.483 -0.433 -0.354 -0.250 -0.129 0.000
-----
102 N nodi con livelli assegnati
26494 1 MAREA PIATTAFORMA
26493 1
26495 1
26239 1
26237 1
25975 1
-----
cut cut cut
-----
31058 1
31298 1
31539 1
31763 1
31979 1
32199 1
32408 1
0 Nnodi con portate assegnate
0 vento assegnato
0 moto ondoso
0 Nele barriera del moto ondoso
0 Nele HF variabile
-----
dati relativi al trasporto solido -----
0 1 sospensione(1/0), Fattore amplificazione evoluzione del fondo
0 condizioni iniziali CONCENTRAZIONE (0=concentrazione_costante; 1=file_restart)
0.0 valore iniziale della concentrazione di SAND
0.0 valore iniziale della concentrazione di MUD
xxxSEDis.rts file di restart della concentrazione di SAND
xxxSEDiM.rts file di restart della concentrazione di MUD
1 condizioni iniziali BED (0=%MUD costante; 1=file_restart)

```

Figura 6.6: File .sim, input del modello Idrodinamico

6.3 RISULTATI (file .out⁴)

Si illustrano in questa sezione i risultati della simulazione soffermandosi su alcuni aspetti più significativi legati al regime idraulico che si instaura in laguna e agli scambi reciproci tra laguna e mare Adriatico.

È interessante innanzitutto indagare le modalità di propagazione dell'onda di marea nelle diverse aree del dominio; a tale scopo si sono individuati quattro punti (figura 6.7) che possono essere in qualche modo rappresentativi della disomogeneità di comportamento che si riscontra nel dominio. Un primo punto è stato posizionato esternamente alla laguna, in prossimità della bocca di Malamocco (punto rosso); un secondo si trova in posizione abbastanza centrale rispetto alla laguna, in particolare in prossimità della città di Venezia (punto verde); mentre si è scelto di fissare gli altri due punti in posizioni più periferiche e defilate, uno in laguna superiore (punto rosa) e uno in laguna inferiore (punto blu).

⁴Il file dei risultati della simulazione, generato dal modello, nel caso di una simulazione idrodinamica contiene i valori delle quote idrometriche per ciascun nodo, delle due componenti delle portate specifiche per ciascuna maglia, delle portate per ciascun canale e per ciascun tronco speciale. Nel caso in cui la simulazione riguardi anche altre componenti non idrodinamiche (trasporto solido, trasporto e diffusione, infiltrazione, moto ondoso), nello stesso file .out sono contenuti anche i parametri (di nodo o di maglia) relativi a tali componenti.



Figura 6.7: Posizione dei quattro punti oggetto di indagine

L'andamento dei livelli nel tempo è rappresentato nel grafico⁵ di figura 6.8.

Si è potuto verificare che la propagazione dell'onda in mare aperto è praticamente istantanea e non produce alterazioni apprezzabili (se non per le irregolarità del primo periodo) così che la curva dei livelli associata al punto rosso è rappresentativa del comportamento dell'onda anche sui confini del dominio, dove le condizioni al contorno sono applicate. Si verifica facilmente sul grafico che le condizioni “estreme” (colmi e cavi) e “medie” (livello nullo) si presentano sulla curva rossa esattamente all'ora terza, sesta, e multipli (come succede anche nel grafico 6.4).

⁵Per compiere tale grafico in *Incidenze* è necessario, all'interno della mesh, selezionare i punti per i quali si vuole la rappresentazione dell'andamento dei livelli nel tempo. Una volta selezionati (al massimo dieci), cliccando sulla *Barra dei bottoni*, si aprirà una finestra secondaria con il grafico. Questo può essere salvato (*esporta grafico*) in formato ASCII con formattazione compatibile con Microsoft Excel; cliccando sul pulsante *Salva lista*, invece, si salvano i punti (nel caso di livelli) o i poligoni (nel caso di portate e profili) utilizzati per generare i grafici. Infine, utilizzando il pulsante *Importa lista* si richiamano le liste eventualmente salvate in precedenza, allo scopo di ottenere i grafici negli stessi punti o per le stesse sezioni (o profili) già considerati precedentemente.

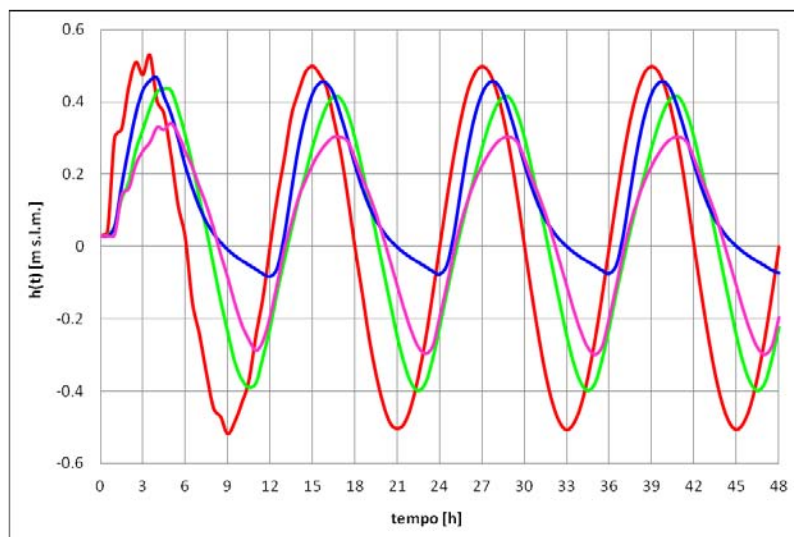


Figura 6.8: Andamento dei livelli nei quattro punti considerati nel tempo

In tutta la laguna, invece, l'onda si propaga con un ritardo apprezzabile rispetto alla situazione in mare: si nota che il fenomeno interessa sia la fase di flusso e crescita dei livelli sia quella di ritiro della marea e abbassamento dei livelli.

Analizzando l'andamento della curva verde si osserva che essa accumula un ritardo di circa un'ora e mezza in corrispondenza dei colmi e dei cavi, rispetto alla curva rossa, inoltre il suo sviluppo in ampiezza non rimane immutato e compreso tra $+0.5 \div -0.5$ ma varia all'incirca tra $+0.4 \div -0.4$.

Passando, poi, allo studio della situazione presente in corrispondenza del punto rosa (laguna superiore) si nota ancora una volta la presenza del ritardo per i colmi e i cavi, sempre di un'ora e mezza all'incirca. Oltre a ciò si constata l'ulteriore diminuzione dello sviluppo dell'ampiezza dell'onda, che in questa situazione è compreso tra $+0.3 \div -0.3$.

Infine si può dire che, per quanto riguarda la posizione del punto posto nella laguna inferiore (punto blu), mentre al passaggio dell'onda positiva si osserva un ritardo di quasi un'ora rispetto alla situazione in mare aperto e una modesta riduzione dei picchi, al contrario l'onda negativa si trasforma riducendo in modo considerevole la propria ampiezza e generando cavi in forte ritardo rispetto alla curva originaria (fino a tre ore nel caso in questione). In definitiva, quest'ultima curva, perde il regolare andamento sinusoidale.

Il grafico evidenzia anche quanto già espresso in precedenza circa la necessità di attendere almeno il terzo periodo per poter considerare l'onda di marea regolarizzata e definitivamente sviluppata, infatti la curva rossa, nel primo periodo in modo molto evidente, è ben lontana dal rappresentare una sinusoide.

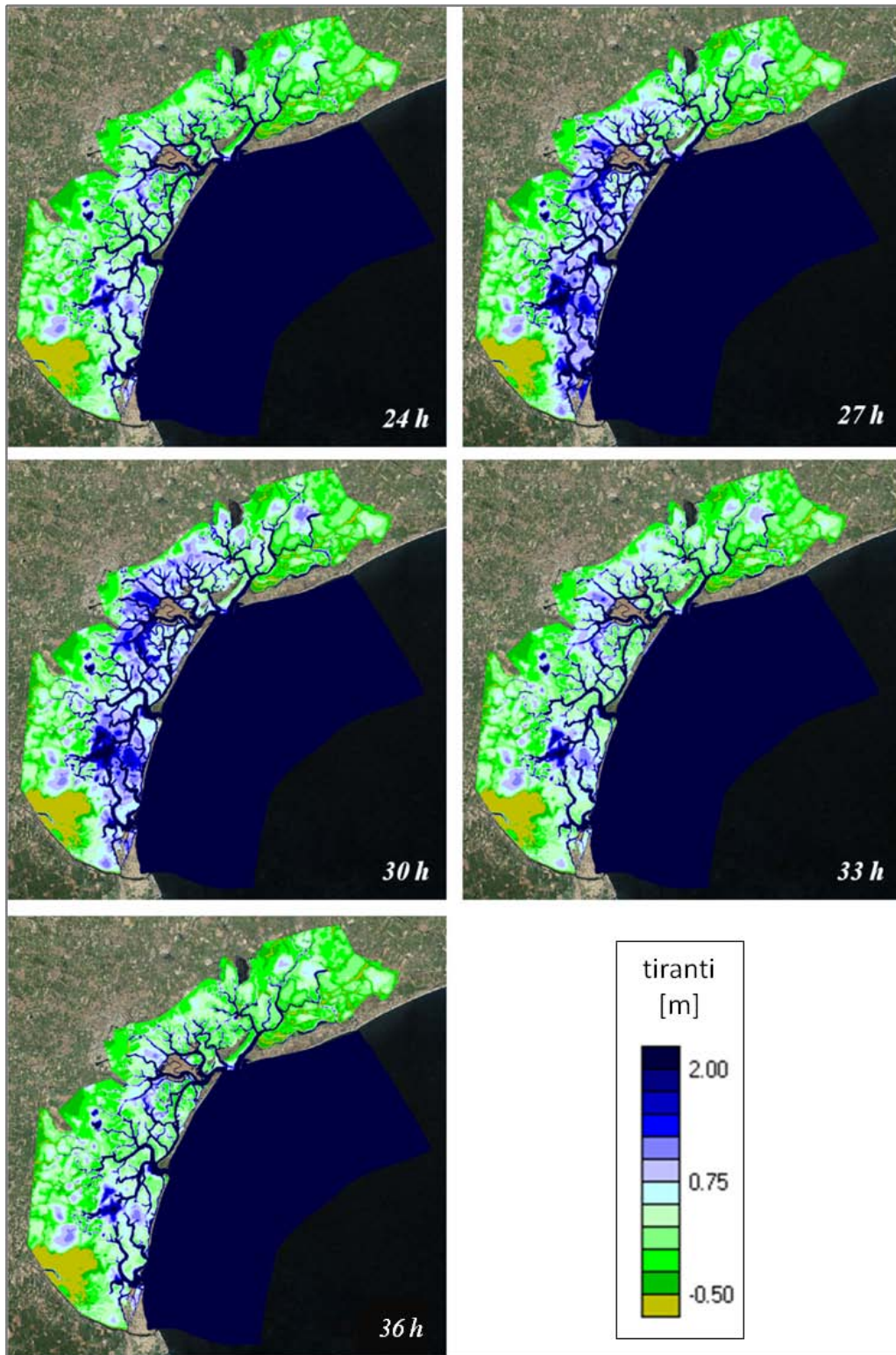


Figura 6.9: Variazioni dei tiranti d'acqua nel tempo nella laguna di Venezia

Nella figura 6.9 è riportato l'andamento dei tiranti (calcolati sui nodi⁶) nel tempo; la visualizzazione grafica a colori fa riferimento al terzo periodo (dalla 24^a ora alla 36^a ora) di marea e fotografa la situazione ad intervalli di tempo di tre ore, in corrispondenza di due punti di flesso (a livello nullo) della sinusoide e del colmo e del cavo propri del periodo analizzato.

I valori dei tiranti variano nel bacino seguendo l'oscillazione della marea. Tuttavia si osserva che in prossimità delle tre bocche il picco più alto e i valori più bassi vengono raggiunti proprio nello stesso momento dei livelli imposti come condizioni al contorno, mentre nelle zone più interne della laguna è visibile un ritardo dell'onda di propagazione.

Si fa notare che il colore giallo-oro, corrispondente a valori di -0.5 metri, evidenzia le aree più elevate del dominio sulle quali l'espansione e il ritiro delle acque non avviene. La zona più estesa con queste caratteristiche è visibile nella laguna inferiore.

Un altro aspetto interessante da investigare riguarda gli scambi idrici che si instaurano tra mare e laguna attraverso le tre bocche.



Figura 6.10: Bocca di Lido, di Malamocco e di Chioggia - sezioni di calcolo della portata

⁶I parametri visualizzabili dall'.out possono essere rappresentati come stringhe contenenti il valore numerico del parametro o come mappa a scala di colori. Per entrambe le opzioni i parametri possono essere valutati come valore nodale, cioè calcolato in corrispondenza ad ogni nodo, o come valore di elemento, cioè calcolato al centro della maglia o del canale/tronco. Tale distinzione è opportuna dal momento che il modello ad elementi finiti lavora su di una griglia sfalsata, calcolando le quote idrometriche sui nodi della griglia e le portate specifiche al centro degli elementi. Inoltre le quote del fondo e i coefficienti di scabrezza attribuiti agli elementi (maglie e canali) sono costanti per ciascun elemento. Ne consegue che, ad eccezione delle quote idrometriche (livelli) e delle portate specifiche, che, per definizione sono calcolate dal modello le une sui nodi e le altre al centro delle maglie, gli altri parametri idrodinamici (tirante, velocità, energia,...) il cui valore è ottenuto combinando livello, portata specifica, quota del fondo, coefficiente di scabrezza, possono essere calcolati sia sui nodi, sia al centro delle maglie. La rappresentazione "per elemento" è in un certo senso più accurata, dal momento che essa è ottenuta valutando il livello al centro dell'elemento come media dei valori sui tre nodi e considerando senza interpolazioni il valore di maglia di portata specifica, quota del fondo e coefficiente di scabrezza. La mappa finale risulta peraltro "discontinua", poiché il generico parametro assume un valore costante entro ogni elemento, ma varia da un elemento all'altro. La rappresentazione "per nodo" ha a sua volta il vantaggio di fornire una mappa con variazioni più graduali, dal momento che prevede una variazione lineare del parametro all'interno del generico elemento. Tuttavia essa risulta meno accurata perché richiede che, ad eccezione del livello, tutte le altre grandezze siano valutate operando una media tra i parametri che competono agli elementi che concorrono nel generico nodo.

Le sezioni di controllo per effettuare la lettura sono evidenziate in figura 6.10, in particolare, in alto a sinistra la Bocca di Lido, a destra quella di Malamocco e in basso la bocca di Chioggia. È necessario precisare che l'ortofoto utilizzata è recente, non essendo disponibile un'immagine dei primi del '900, per questo motivo in essa sono visibili anche i moli relativi alla bocca di Chioggia, che in realtà nel 1901 non erano ancora stati costruiti ma erano in fase di progettazione.

Il grafico⁷ 6.11 mette a confronto le portate di scambio attraverso le tre bocche e a queste affianca l'andamento dei livelli in laguna (come in figura 6.8).

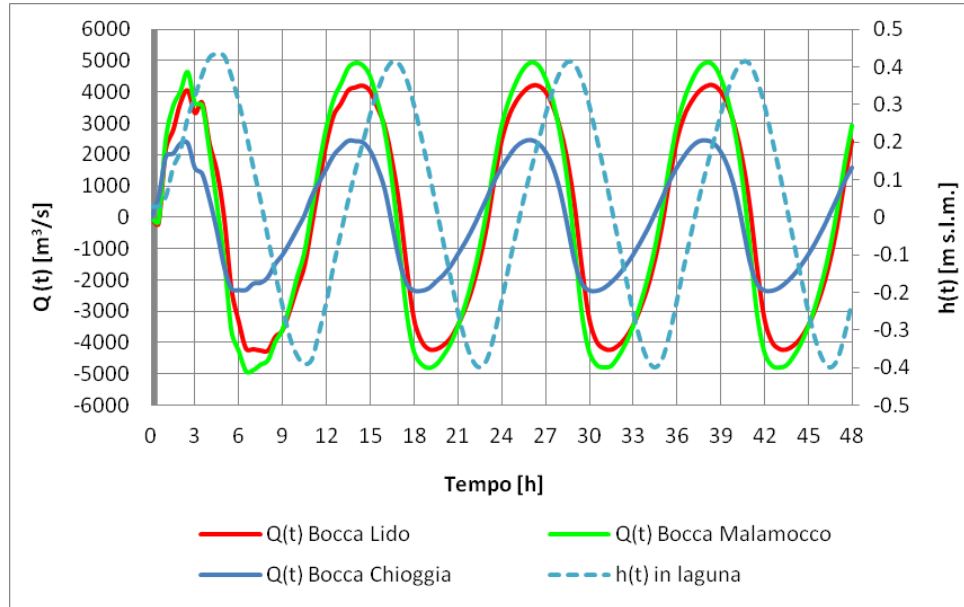


Figura 6.11: Portate di scambio mare-laguna attraverso le tre bocche e livelli in laguna

L'andamento delle portate è grossomodo sinusoidale e coerente con quanto già rilevato per i livelli: come ci si può aspettare, rispetto alla curva $h(t)$, le curve delle portate risultano sfasate, mediamente in anticipo di quasi tre ore. Le $Q(t)$ sono positive (in ingresso) durante la fase di innalzamento del livello e “riempimento” della laguna e viceversa negative durante la fase di abbassamento del livello del bacino. Idealmente (se la propagazione dell'onda di marea fosse istantanea) i massimi positivi e negativi di portata dovrebbero coincidere con le condizioni di livello nulle, ovvero con i punti di flesso a pendenza rispettivamente positiva e negativa della $h(t)$, allo stesso modo ci dovrebbe essere coincidenza tra i picchi di livello e l'annullamento del valore di portata.

Si osserva che, mentre per le curve relative alle portate transitate nelle bocche di Lido e di Malamocco i picchi positivi e negativi di portata sono in anticipo di circa tre ore rispetto ai corrispondenti picchi di livello, per la curva riferita alla portata della bocca di Chioggia i picchi negativi di portata si trovano sfasati di quasi quattro ore e mezzo rispetto alle condizioni di minimo livello in laguna, che si è visto, realizzarsi con circa un'ora di ritardo rispetto al mare aperto.

⁷ Per compiere tale grafico in *Incidenze* è necessario selezionare le tracce delle sezioni attraverso le quali si vuole compiere il calcolo della portata fluente, una volta selezionate (al massimo dieci), cliccando sulla *Barra dei bottoni*, si apre una finestra secondaria con il grafico dell'andamento nel tempo della portata.

Le portate massime in ingresso sono di 4228 m³/s, 4943 m³/s e di 2454 m³/s rispettivamente per la bocca di Lido, di Malamocco e di Chioggia e si realizzano alla 38^a ora, le massime in uscita invece toccano i 4217 m³/s, 4784 m³/s e i 2346 m³/s alla 43^a ora circa.

Una rappresentazione efficace dei flussi che si instaurano in laguna al passaggio dell'onda di marea si ottiene visualizzando le velocità che animano le correnti. La figura 6.12 propone una rappresentazione scalare mediante scala cromatica delle velocità che si presentano durante la fase di flusso (a sinistra), misurata alla 37^a ora, e la fase di riflusso (a destra) alla 43^a ora, quando si verifica la massima portata in uscita.

Si nota come le velocità assumano valori più alti in corrispondenza delle tre bocche e lungo i canali principali della laguna di Venezia, mentre nelle aree più periferiche del bacino, in particolare nella laguna superiore e inferiore dove la presenza di barene è molto diffusa, si riscontrano velocità pressoché nulle.

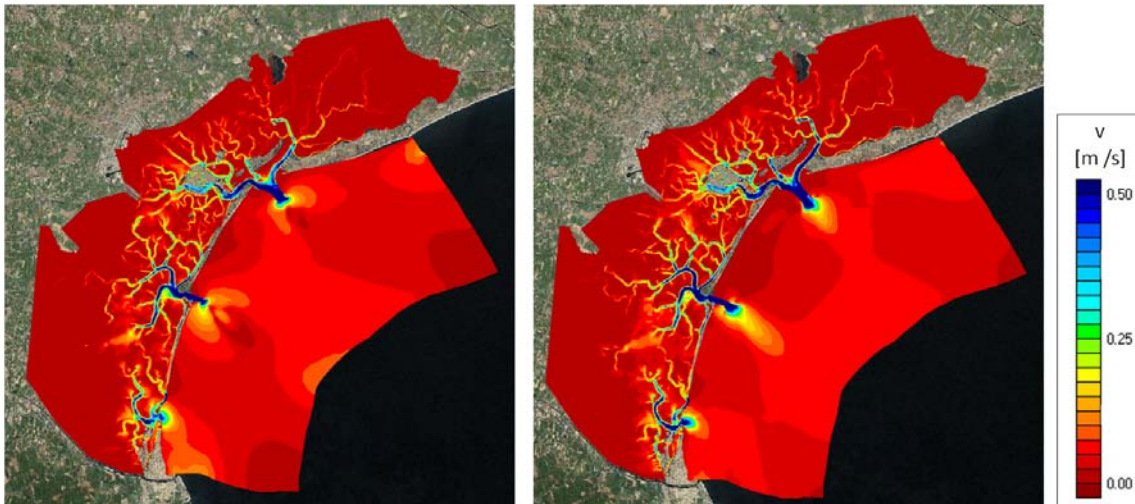


Figura 6.12: Rappresentazione scalare delle velocità (fase di flusso e riflusso)

La figura 6.13 propone la rappresentazione scalare mediante scala cromatica alla quale si sovrappongono le frecce che definiscono punto per punto direzione e verso delle velocità⁸; le due situazioni fotografano la bocca di Chioggia alla 37^a e alla 43^a ora, perciò in corrispondenza della fase di flusso e riflusso in laguna. È possibile osservare come i vettori, nell'immagine di sinistra, siano diretti verso la bocca lagunare e l'interno del bacino partendo dal mare aperto; al contrario, la fotografia di destra evidenzia l'uscita dei vettori-velocità dalla laguna inferiore.

⁸In *Incidenze* i parametri vettoriali (velocità, portata specifica, sforzo al fondo) possono essere rappresentati sotto forma di vettori, per i quali è possibile selezionare il colore e le dimensioni delle frecce. I vettori possono essere di dimensioni proporzionali al valore del parametro oppure tutti delle stesse dimensioni.

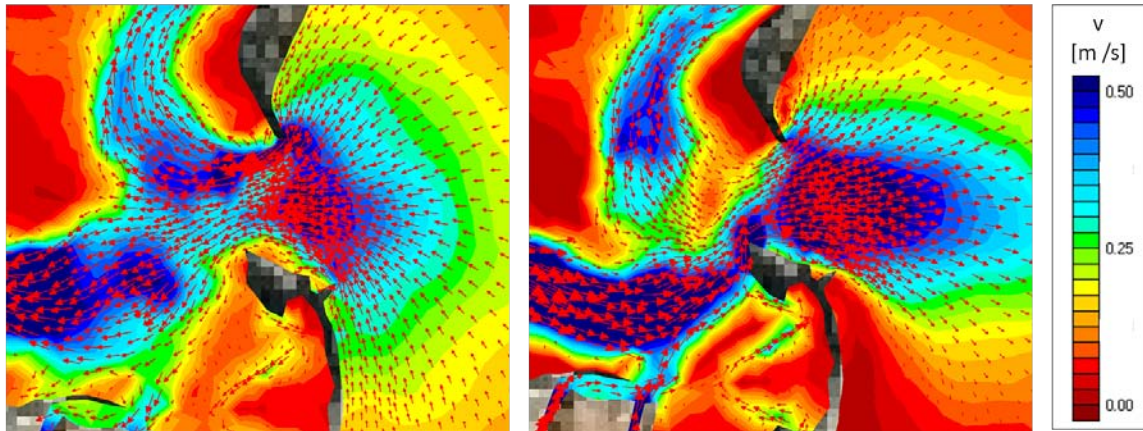


Figura 6.13: Rappresentazione scalare e vettoriale delle velocità (fase di flusso e riflusso) - dettaglio bocca di Chioggia

Capitolo 7

APPLICAZIONE DEL MODELLO LAGRANGIANO

Lo studio delle modalità di dispersione dei soluti nella laguna di Venezia è stato condotto utilizzando il software *lagrangiano.exe*, messo a disposizione dal dipartimento ICEA, il quale implementa una soluzione discreta di tipo lagrangiano le cui basi matematico/analitiche sono state esposte nel capitolo 5.

In questo capitolo si illustreranno le operazioni preliminari e di contorno necessarie per l'utilizzo del modello, le scelte operative effettuate e i risultati ottenuti.

Il fenomeno dispersivo verrà indagato attraverso la definizione, all'interno della laguna, di un numero finito ma sufficientemente elevato di punti su cui rilasciare una certa concentrazione di particelle (in seguito chiamate anche "macchie") con caratteristiche fisiche e geometriche assegnate. Questa concentrazione, sottoposta alle condizioni idrodinamiche già definite nel capitolo precedente, simulerà il comportamento di un generico soluto che viene immesso istantaneamente nel dominio, comportandosi a tutti gli effetti come un tracciante.

L'analisi prevede una prima fase di identificazione geografica all'interno del dominio dei punti di interesse che dovranno essere oggetto di studio e, in secondo luogo, la creazione e compilazione dei files che intervengono nell'utilizzo del modello *Lagrangiano*: un file *.out* contenente i risultati dell'idrodinamica, opportunamente rimaneggiato, e un file *.SIM* simile a quello descritto nella sezione 6.2.

I file *.trk* di output consentono di visualizzare graficamente, attraverso *Incidenze*¹, il processo dispersivo delle macchie nel tempo e costituiscono a loro volta l'input per il calcolo del coefficiente di dispersione intermareale (di cui si tratterà ampiamente nel prossimo capitolo) che completa lo studio fornendo, allo stesso tempo, una lettura sintetica ed immediata dell'entità del fenomeno dispersivo sull'intero dominio.

¹Il programma consente di impostare i parametri della visualizzazione di un file risultati di simulazioni "particle tracking" ottenute con il modello lagrangiano-dispersivo (file di tipo *.trk*). I risultati sono visualizzati come delle "nuvole" di particelle, di cui si può definire la dimensione e la forma. È possibile visualizzare inoltre il valore numerico che il modello *lagrangiano* attribuisce a ciascuna particella, in modo da poterla seguire lungo i suoi percorsi, differenziandola da quelle di origine diversa. I risultati del calcolo si possono esaminare selezionando l'istante desiderato oppure attivando la rappresentazione dinamica dei risultati, che riproduce gli istanti di calcolo in sequenza; in quest'ultimo caso si può impostare anche l'intervallo, in secondi, tra un'immagine e la successiva.

7.1 DEFINIZIONE DEI PUNTI ANALIZZATI

La natura stessa del modello *Lagrangiano*, che prevede la simulazione della dispersione di particelle a partire da sorgenti puntuali concentrate, implica la necessità di operare uno studio sul dominio per stabilire quanti e quali siano i punti sui quali procedere con l'analisi.

La quantità e la posizione dei punti nasce dal compromesso tra la necessità di fornire un'accettabile grado di continuità spaziale alle misure rilevate e l'obiettivo di limitare il carico computazionale snellendo per quanto possibile l'intero processo di calcolo.

Si indica ora la serie di operazioni effettuate:

- innanzitutto è stato consultato e analizzato il file .xyz contenente le coordinate delle 1100 macchie utilizzate per l'individuazione dei coefficienti di dispersione intermareale nella laguna di Venezia del 2003. Dal momento che il dominio di calcolo, usato in questo lavoro (relativo alla laguna del 1901), differisce da quello utilizzato per lo studio della situazione del bacino nei primi anni del 2000, è stato necessario eliminare i punti esterni al nostro dominio, aggiungerne di nuovi nelle zone periferiche (non presenti nel .geo del 2003) e riposizionare alcune macchie facendo in modo che ripercorressero il corso, di un tempo, dei principali canali. Inoltre sono stati tolti i punti che si trovavano sulle barene (identificate come le zone con quota superiore a 0.25 metri rispetto al livello medio del mare) affinché non influenzassero negativamente le aree oggetto di studio adiacenti ai punti stessi. Un'accortezza particolare è stata riservata alle macchie che cadevano molto vicino al confine del dominio, infatti dal momento che su ogni punto di interesse, scelto in questa fase, si posizionerà una macchia concentrata di particelle di raggio convenzionale pari a 10 metri, è stato necessario verificare che tutti i punti "periferici" osservassero una distanza "di rispetto" dal confine pari al valore del raggio.
- Sono state così individuate le macchie sulle quali si è compiuto un primo studio al fine di migliorarne il risultato. Infatti dall'osservazione dell'output ottenuto² ci si è accorti della presenza di alcune situazioni anomale: in particolare alcune macchie di colore si differenziavano in modo evidente dalle tonalità visibili nelle zone a loro contigue. Generalmente questo era dovuto al posizionamento del punto in una zona caratterizzata da una profondità diversa rispetto alle macchie vicine (per esempio su una barena) oppure in un'area con maggior velocità della corrente (per esempio in un piccolo canale). In questi casi si è scelto di riposizionare quei punti in modo da raggiungere un risultato più omogeneo con variazioni cromatiche graduali.
- Inoltre è stata percepita la necessità di infittire il numero delle macchie in alcune zone: soprattutto a ridosso delle bocche di accesso al mare e lungo il corso dei canali principali che da esse si snodano e si ramificano. Questa operazione consente di ricavare un maggior grado di dettaglio nello studio del fenomeno dispersivo nei siti in questione: zone in cui, al passaggio dell'onda di marea, si instaurano i maggiori gradienti di velocità della corrente e sulle quali è quindi ragionevole pensare che i parametri che descrivono la dispersione godano di altrettanta variabilità. L'opportunità di disporre di un maggior numero di rilievi in prossimità delle

²Ci si riferisce alla rappresentazione cromatica del $\log(D)$ visualizzata attraverso il programma *Incidenze*. Il procedimento seguito per raggiungere questo risultato è ampiamente descritto nel capitolo relativo al coefficiente di dispersione intermareale.

bocche soddisfa anche esigenze pratiche in fase di assegnazione finale del coefficiente di dispersione intermareale alle maglie (del .geo) del dominio: poter contare su più punti di studio dove più spinta è la discretizzazione geometrica del territorio permette di limitare almeno in parte le inevitabili approssimazioni legate alle operazioni di interpolazione dei risultati.

- Si sono svolte quindi più simulazioni (variando il numero e la posizione dei punti) in modo da poter analizzare e confrontare i diversi risultati e di conseguenza migliorarli. Procedendo in questo modo si è giunti alla configurazione definitiva che comprende 1320 macchie disposte sull'intera area di studio.

7.2 GESTIONE DELL'IDRODINAMICA (file .out)

Il file .out, ottenuto dallo studio idrodinamico, rappresenta il punto di partenza per l'applicazione del modello *Lagrangiano* che simula la dispersione e richiede la conoscenza, puntuale e ad ogni istante, delle caratteristiche del moto del fluido.

Questo file, però, non viene utilizzato così come restituito dal modello *Idrodinamico*, infatti è necessario compiere alcune modifiche in esso al fine di rappresentare correttamente le diverse situazioni che si intendono studiare e correggere alcune imprecisioni introdotte dal modello. Come già sottolineato nel capitolo precedente il sistema necessita di un certo tempo d'avvio prima di raggiungere la completa stabilità delle condizioni idrauliche. La figura 6.8 evidenzia infatti l'esigenza di attendere oltre il secondo periodo per poter considerare il moto come perfettamente periodico, così che delle 48 ore di simulazione idrodinamica soltanto le ultime 24 rappresentano un comportamento realistico, privo di effetti parassiti. Come si vedrà, i files .out ricavati in questa fase sono estratti dagli ultimi due periodi (il terzo e il quarto) dell'originale.

Nonostante lo studio prenda in considerazione un'unica tipologia di onda di marea (ampiezza e periodo assegnati e costanti), le simulazioni di dispersione vedranno coinvolte condizioni idrodinamiche estratte in momenti diversi dello sviluppo dell'onda. In particolare tutte le macchie del dominio saranno sottoposte a quattro diverse simulazioni ognuna caratterizzata da una differente condizione di partenza corrispondente rispettivamente al passaggio del flesso crescente (livello nullo e marea in crescita), del colmo (livello massimo), del flesso calante (livello nullo e marea in ritiro) e del cavo (livello minimo) dell'onda di marea.

Quattro sono quindi i files .out utilizzati, ottenuti tramite estrazione di singoli periodi dal .out originale (figura 6.4). L'operazione è stata eseguita tramite un'utility³ del software *Incidenze* che consente di parzializzare tale file specificando i limiti temporali (istante iniziale e finale, entrambi in secondi) dell'estrazione e un nuovo passo temporale di stampa per i nuovi files così ottenuti. In tutti i casi quest'ultimo parametro è stato mantenuto pari a 1800 secondi, come per l'originale file dei risultati idrodinamici.

I quattro files sono stati poi convertiti, tramite il comando "converti", presente anch'esso in *Incidenze*, dalla versione 1 (fornita del modello *Idrodinamico*) alla versione 2 necessaria per la loro lettura nel *Lagrangiano*.

³Il comando "estrai parte" si utilizza per costruire un nuovo file .out che contenga solo una parte del file originale. Tramite una finestra di dialogo è possibile selezionare gli istanti iniziale e finale e l'intervallo di stampa per il nuovo file. Tale operazione può essere utile per generare dei files .out semplificati a partire da un file di grandi dimensioni.

Le immagini e la tabella che seguono evidenziano quali sono le condizioni idrauliche (andamento dei livelli sul contorno del dominio) relative alle quattro situazioni e i corrispondenti estremi temporali di estrazione dall'originale.

File .out	Estremi temporali di estrazione	Corrispondente condizione idraulica iniziale
File .out n° 1	Ore: 24 - 35.5 (86400s - 127800s)	Flesso dell'onda di marea (marea crescente)
File .out n° 2	Ore: 27 - 38.5 (97200s - 138600s)	Colmo dell'onda di marea
File .out n° 3	Ore: 30 - 41.5 (108000s - 149400s)	Flesso dell'onda di marea (marea calante)
File .out n° 4	Ore: 33 - 44.5 (118800s - 160200s)	Cavo dell'onda di marea

Tabella 7.1: Riepilogo files .out utilizzati dal modello Lagrangiano

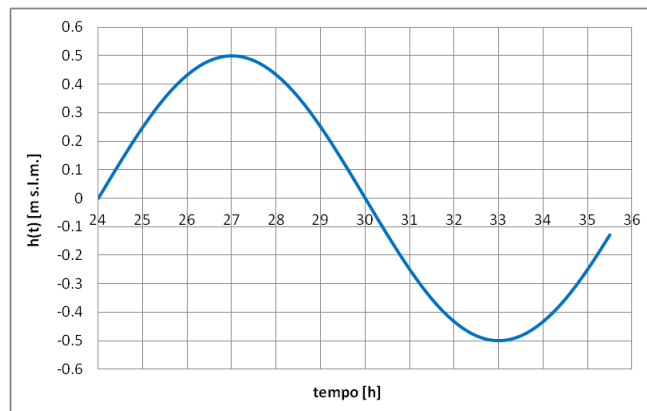


Figura 7.1: Andamento dei livelli al contorno relativo al file .out n° 1

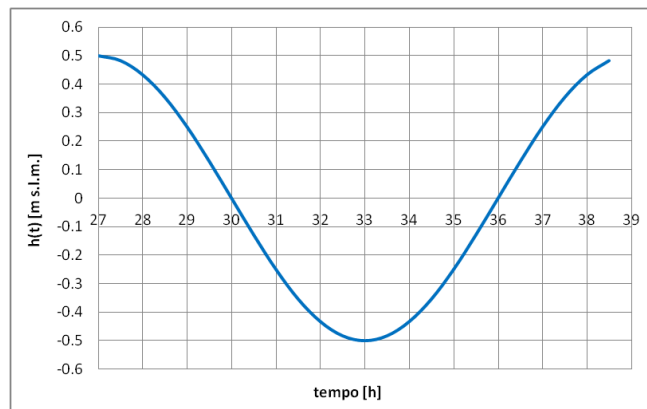


Figura 7.2: Andamento dei livelli al contorno relativo al file .out n° 2

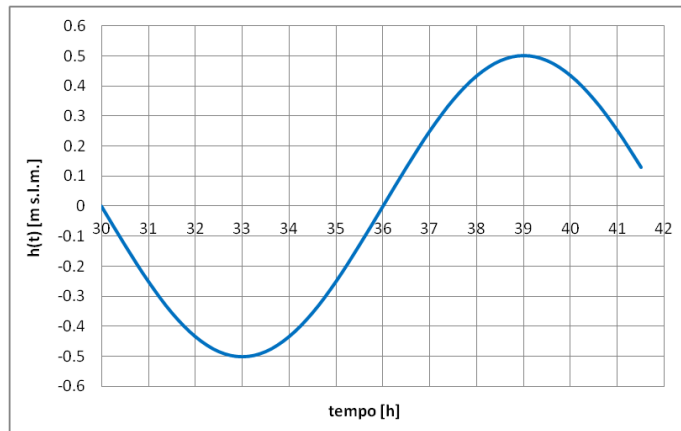


Figura 7.3: Andamento dei livelli al contorno relativo al file .out n° 3

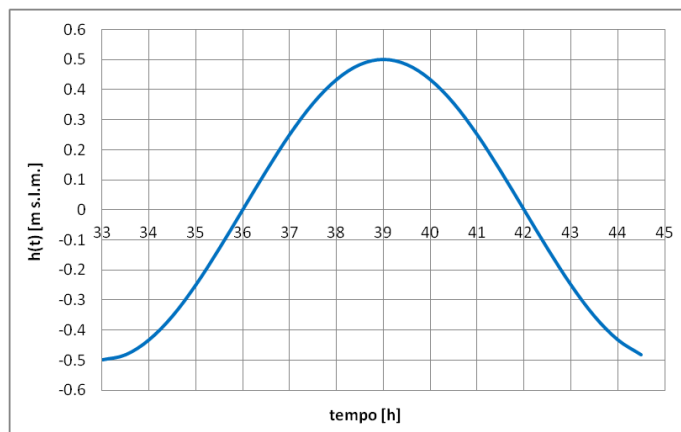


Figura 7.4: Andamento dei livelli al contorno relativo al file .out n° 4

Come si può osservare dai grafici riportati, i files .out ottenuti non coprono un intervallo di tempo pari al periodo (12 ore) ma più corto di 30 minuti (1800 secondi, pari all'intervallo di stampa dei risultati). Il motivo di questo troncamento è legato al fatto che il modello *Lagrangiano* continua a ripetere la lettura del .out in modo continuativo per tutto il tempo necessario (arbitrario e definito nel file .SIM) a portare a termine la simulazione di dispersione. Per riprodurre nel lungo periodo l'idrodinamica esattamente corrispondente a una sinusoide dei livelli è necessario includere nel periodo di base solo uno dei due estremi di stampa.

7.3 CONDIZIONI AL CONTORNO E ISTRUZIONI DI CALCOLO (file .SIM)

Il file .SIM contiene le istruzioni per l'esecuzione del modello *Lagrangiano*. Si tratta ancora una volta di un file di testo che, in parte, nella struttura e nei contenuti è simile al file .sim compilato per il modello *Idrodinamico*. Di seguito si illustrano le modalità di compilazione in modo abbastanza sintetico, soffermandosi maggiormente sugli aspetti specifici del caso in questione.

Un estratto del file .SIM, utilizzato per una delle simulazioni, è presentato in figura 7.5. Esso si articola nei seguenti gruppi di dati:

- “dati generali della simulazione”: si definiscono qui la durata della simulazione (TT), il passo temporale di integrazione (dt) e il passo temporale di stampa dei risultati (dtprt), tutti espressi in secondi. A seguire è richiesta l’indicazione del nome del file .geo su cui si opera la simulazione, del file .out che contiene il calcolo dell’idrodinamica e del file .trk che conterrà i risultati.
- “Condizioni al contorno”: si indicano in questa sezione i nodi del dominio, così come numerati nel file .geo, da trattare come contorno permeabile del dominio, cioè i nodi su cui le condizioni al contorno idrodinamiche sono applicate e attraverso i quali si possono instaurare scambi idrici con l’esterno.
- “Condizioni iniziali”: si può fornire o meno un file .bup; in sua assenza le particelle verranno collocate nella posizione iniziale prevista dai dati assegnati più avanti nel file. Se invece viene fornito, esso contiene la posizione “iniziale” delle particelle che tipicamente corrisponde alla loro posizione dopo un certo numero di cicli di marea, calcolata mediante una precedente simulazione.
- “Dati per il trasporto e diffusione”: a questo punto si inseriscono tutte le informazioni relative alle macchie che vengono coinvolte nella simulazione. La prima riga contiene il numero di macchie che si intende inserire nel dominio, le successive sono riservate, una per ogni macchia, alla definizione della collocazione e della geometria di ciascuna: su quattro colonne distinte si indicano nell’ordine il numero di particelle contenute nella macchia, le coordinate x e y del centro e il raggio della stessa.

Lo studio della dispersione è stato affrontato per parti, coinvolgendo in ciascuna simulazione un numero inferiore rispetto al totale delle macchie: i 1320 punti oggetto d’analisi sono stati suddivisi in due sottogruppi ciascuno composto da 660 macchie. Si è deciso di procedere in questo modo innanzitutto perchè il modello *Lagrangiano* utilizzato non può lavorare per un numero superiore alle 1000 macchie (ciascuna di mille particelle) e in secondo luogo per diminuire il carico computazionale e il tempo d’attesa di ogni simulazione.

La durata di tutte le simulazioni è stata fissata in 18 ore (64800 s); il passo temporale di calcolo in 5 secondi mentre la frequenza di stampa delle variabili si è posta pari a 1800 secondi (mezz’ora), reputata sufficiente per una buona rappresentazione del fenomeno in fase di lettura dei risultati.

I nodi che costituiscono il contorno permeabile del dominio sono ovviamente gli stessi 102 nodi già coinvolti nel file .sim.

In tutte le simulazioni le macchie sono state riprodotte come concentrazioni di 1000 particelle distribuite in modo casuale entro aree circolari del raggio di 10 metri; le coordinate del centro di ogni macchia sono state scelte seguendo le operazioni spiegate nella sezione 7.1.

```

stringa con titolo del lavoro
***** DATI GENERALI DELLA SIMULAZIONE *****
64800. 5.0 1800. 0 TT,dt,dtprt,ivideo
Laguna1901.geo
file1vers2_IDRO.out
laguna1901fase1a.trk
***** CONDIZIONI AL CONTORNO IDRODINAMICA *****
102,livelli assegnati
26494 1 1.0 mare
26493 1 1.0 mare
26495 1 1.0 mare
26239 1 1.0 mare
26237 1 1.0 mare
25975 1 1.0 mare
-----
cut cut cut
-----
31979 1 1.0 mare
32199 1 1.0 mare
32408 1 1.0 mare
0 portate assegnate
0 numero di nodi con scala portate
***** CONDIZIONI INIZIALI *****
0 eventuale lettura da restart
nomefile.bup nome file restart
***** DATI PER IL TRASPORTO E DIFFUSIONE *****
parametri della diffusione
660 numero di macchie
1000 2304311.724 5007367.069 10
1000 2305579.607 5007296.239 10
1000 2303904.017 5007432.791 10
1000 2303661.312 5007498.018 10
-----
cut cut cut
-----
1000 2305993.552 5034065.280 10
1000 2313969.101 5033468.952 10
1000 2306990.536 5033990.735 10
0 0.3 0/1 distribuzione uniforme e numero di particelle/metro quadro
***** elimina velocita residue *****
0

```

Figura 7.5: File .SIM, input del modello Lagrangiano

7.4 LETTURA DEI RISULTATI (file .trk)

Come già detto, i risultati delle simulazioni vengono salvati nei files .trk che, caricati in *Incidenze*, consentono di visualizzare la posizione iniziale delle macchie nel dominio e di seguire nel tempo il movimento delle particelle che le compongono.

Dal momento che le particelle si diffondono e si disperdono nel bacino in maniera differente a seconda della loro posizione di partenza, si effettuano le simulazioni allo scopo di chiarire la relazione esistente tra la loro posizione iniziale e i risultati che si ottengono. Di conseguenza il modello *Lagrangiano* è stato applicato posizionando le macchie in diverse aree del dominio studiato; in particolare, di seguito, viene illustrato il comportamento di tre gruppi di macchie, disposti rispettivamente nella laguna superiore, centrale e inferiore, selezionati in modo da fornire una buona copertura geografica della laguna.

In queste simulazioni, dove non viene considerato l'effetto della fase della marea, si utilizza l'idrodinamica relativa al file .out n° 1 dove l'istante iniziale coincide con il manifestarsi del flesso dell'onda di marea, e ciò si può interpretare anche come immissione delle macchie nel dominio durante la fase di crescita dell'onda, nel momento in cui si annullano i livelli.

In generale si può osservare come le concentrazioni di tracciante si muovano in modo regolare e si diffondano gradualmente durante un ciclo di marea; il baricentro delle macchie disegna una traiettoria che, al termine di un periodo, cioè quando si ripresentano le condizioni idrauliche iniziali,

lo riporta nelle vicinanze della collocazione iniziale. Il recupero della posizione a distanza di un periodo non è quindi completo, segno che l'insieme delle particelle nel complesso è soggetto a spostamenti irreversibili dovuti a quelle che vengono definite "velocità residue".

In questo capitolo, per la discussione dei risultati, sono stati appositamente creati dei gruppi di macchie sufficientemente distanti tra loro in modo da non generare confusione nella visualizzazione grafica e il cui comportamento sia in qualche misura rappresentativo della situazione nell'area circostante a ciascuna macchia.

Per ogni serie di macchie si è riportata un'immagine che fotografa la posizione delle particelle ad intervalli di 24 ore per l'intera durata della simulazione (72 ore) al fine di fornire una rappresentazione qualitativa del fenomeno.

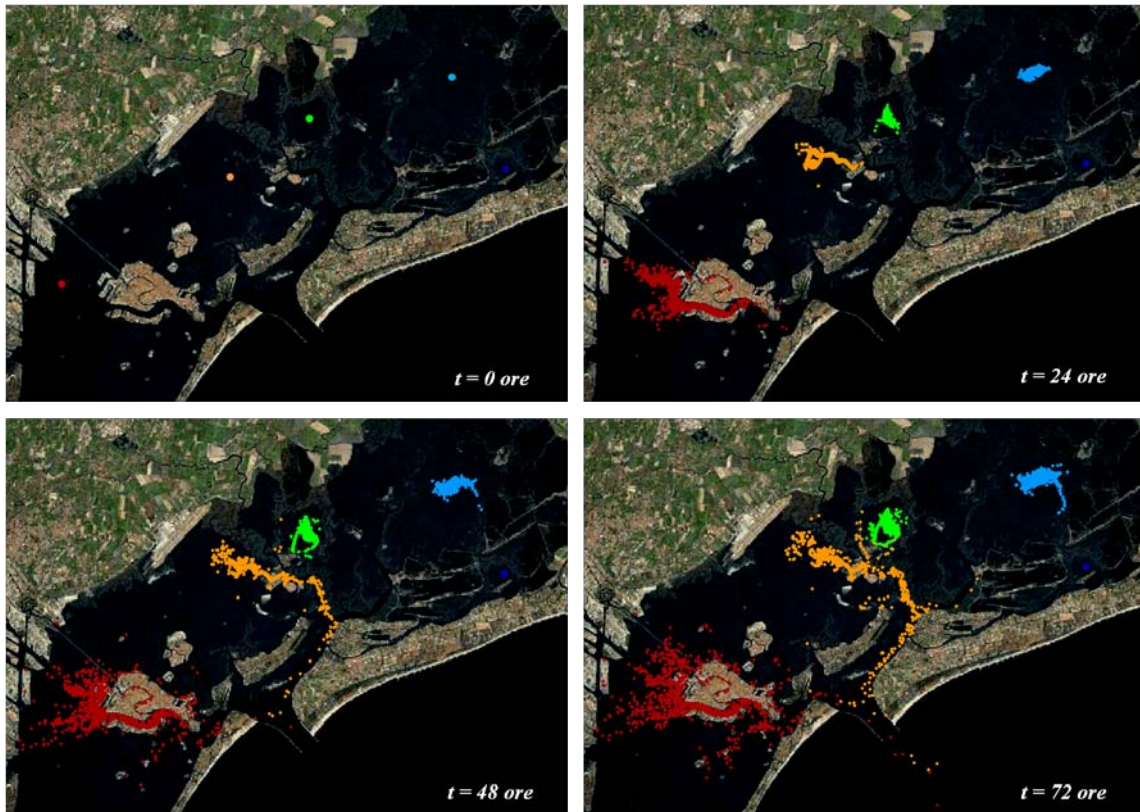


Figura 7.6: Laguna superiore, dispersione con immissione a marea crescente (livelli nulli)

Nella figura 7.6 si possono osservare i risultati della dispersione delle particelle appartenenti alle cinque macchie disposte nella laguna superiore. La differente diffusione caratterizzante ciascuna macchia è chiara e già alla 24^a ora è percepibile. La macchia blu, nemmeno al termine della simulazione presenta una dispersione visibile: la sua posizione infatti rimane inalterata nel tempo e questo è causato dall'assenza delle correnti in tali aree della laguna abbondanti di valli da pesca. Le macchie azzurra e verde, situate anch'esse nell'area nord del dominio, dopo 24 ore evidenziano una piccola dispersione che aumenta moderatamente nelle successive 36, rimanendo comunque nel

complesso bassa. La macchia arancione, invece, è caratterizzata da una buona diffusione osservabile già dalla 24^a ora che si incrementa fino al termine della simulazione rimanendo però meno intensa rispetto a quella propria della macchia rossa. Quest'ultima, posizionata nelle vicinanze della città di Venezia, si disperde molto di più rispetto agli altri quattro gruppi di particelle: questo comportamento è causato dalla presenza in tale zona di profondi canali e maggiori correnti che migliorano in modo evidente la sua diffusione. In entrambe le situazioni (macchie arancione e rossa) proprio la maggior vivacità delle correnti riesce a strappare le particelle alla loro posizione originaria portandole, in parte, a disperdersi anche in mare.

Pertanto, è chiaro che la posizione delle particelle può influenzare la dispersione in acque basse: muovendosi della bocca di Lido, caratterizzata da profondi canali, verso le zone più periferiche della laguna superiore si osserva che l'effetto della dispersione diminuisce notevolmente e perciò la capacità di ricircolo, in tali aree, è decisamente limitata. In queste zone le macchie (blu, azzurra e verde), come già sottolineato, sono caratterizzate da una certa staticità e da una scarsa propensione alla dispersione, conservando anche nel lungo periodo una discreta compattezza e mantenendosi sempre distinte le une dalle altre.

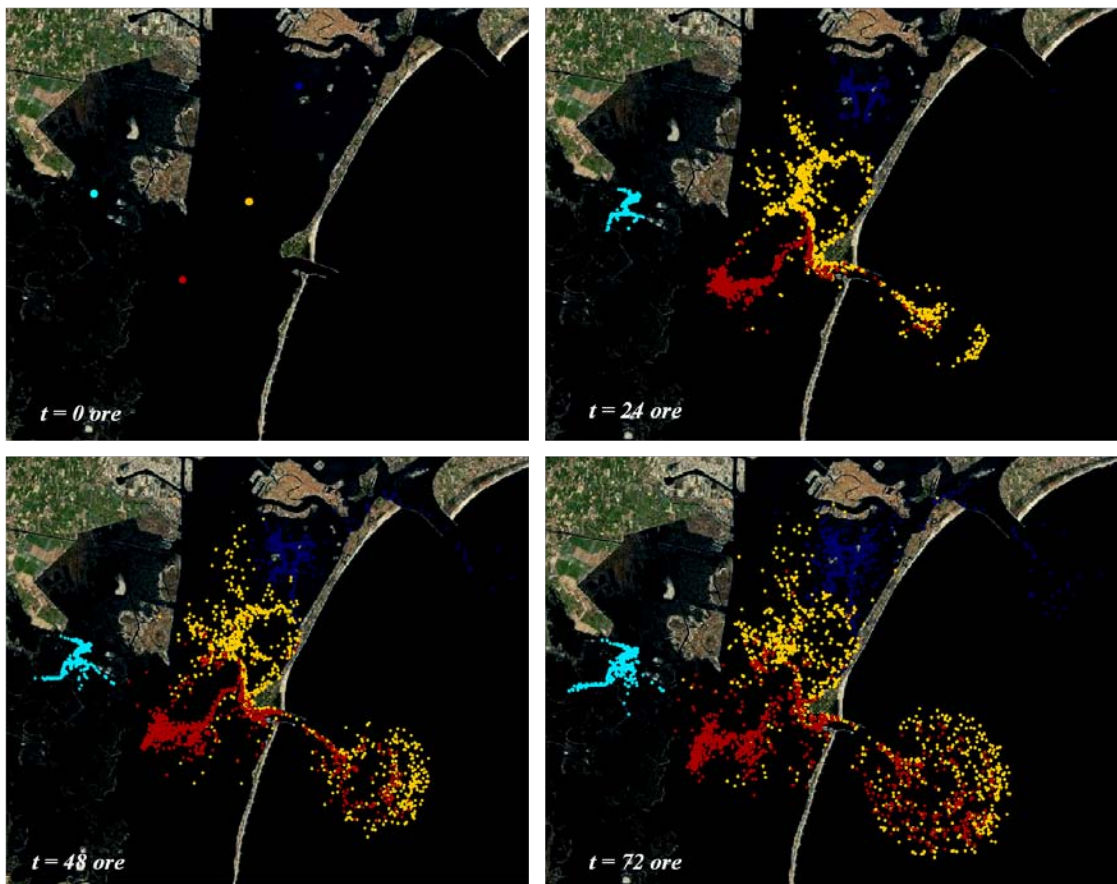


Figura 7.7: Laguna centrale, dispersione con immissione a marea crescente (livelli nulli)

La figura 7.7 evidenzia i risultati relativi alla laguna centrale dove vengono rilasciate quattro macchie. Come previsto, le macchie che possiedono una maggiore dispersione sono quella arancione e quella rossa, infatti la loro posizione iniziale si trova nei pressi della bocca di Malamocco. Le forti correnti entranti e uscenti dal bacino, attraverso il canale principale, incrementano la dispersione al punto che parecchie particelle appartenenti alle due macchie in questione (quelle arancioni in quantità superiore) vengono scacciate dalla laguna e si disperdono in mare aperto. La situazione è differente per le macchie blu e azzurra le quali non si disperdono molto neppure al termine della simulazione. In particolare la macchia azzurra si diffonde poco perchè, in effetti, la sua posizione di partenza è stata scelta in prossimità delle zone ricche di barene e di stretti canali, quindi caratterizzate da deboli correnti e pertanto da basse dispersioni.

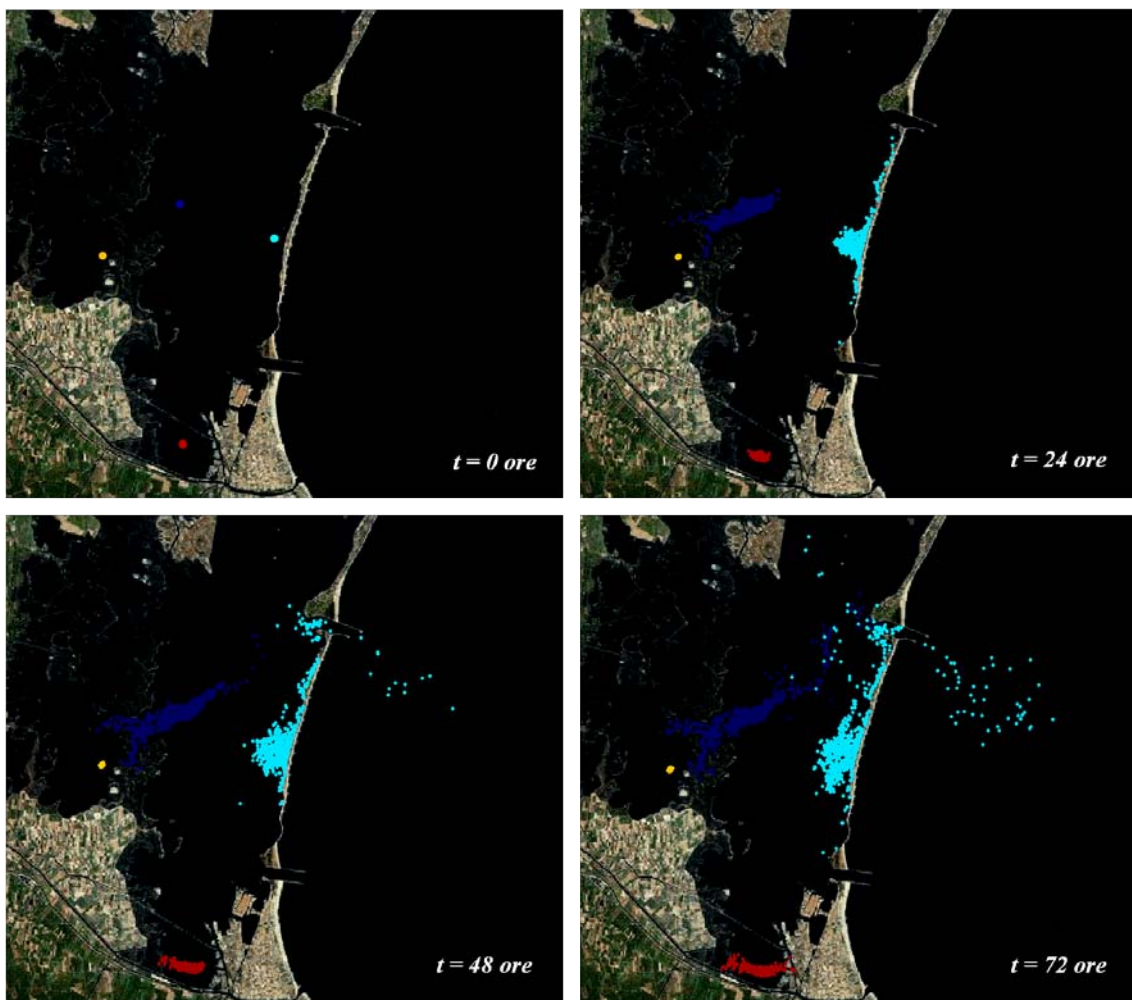


Figura 7.8: Laguna inferiore, dispersione con immissione a marea crescente (livelli nulli)

Anche nella laguna inferiore sono state disposte quattro macchie visibili nella figura 7.8. Come nelle situazioni precedenti, risulta evidente come la vicinanza ai canali principali e alle bocche

influenzi notevolmente la diffusione delle particelle. Infatti un'analisi d'insieme mostra una tendenza alla dispersione più marcata nella zona compresa tra le due bocche dove si trovano le macchie blu e azzurra, mentre rileva nelle zone periferiche (macchie rossa e gialla) un limitato ricambio idrico in quanto le macchie si mantengono compatte e mostrano una notevole inerzia allo spostamento durante tutta la simulazione. In particolare la macchia gialla non si disperde visibilmente, mentre quella rossa, posta nella parte più a sud della laguna, si diffonde molto poco. Si osserva, inoltre, che nonostante le due concentrazioni di tracciante (blu e azzurra) si trovino all'incirca alla stessa distanza dalle due aperture a mare, la maggiore attività della bocca di Malamocco (vista nella sezione 6.3) evidenzia la propria influenza e chiama a sé le particelle delle due macchie che dalla 48^a ora l'attraversano disperdendosi in mare. Infine si può notare che la presenza del litorale in prossimità della macchia azzurra crei le condizioni per uno spostamento compatto della macchia lungo i suoi confini.

Capitolo 8

IL COEFFICIENTE DI DISPERSIONE INTERMAREALE E LE

VELOCITÀ RESIDUE

8.1 RAPPRESENTAZIONE DEL COEFFICIENTE DI DISPERSIONE INTERMAREALE

La dispersione intermareale è il meccanismo dominante di mescolamento e di trasporto a lungo termine agente in laguna di Venezia. Essa determina la distribuzione spaziale in laguna dei traccianti conservativi e il tempo di residenza di tali traccianti nelle diverse zone lagunari più o meno confinate. Anche per i traccianti non conservativi, nonché per i traccianti pesanti in sospensione, quali i sedimenti responsabili dell'evoluzione morfologica della laguna, la dispersione intermareale è fondamentale ed è certamente fra i meccanismi di trasporto più difficilmente quantificabili.

A partire dai risultati ottenuti mediante il modello *Lagrangiano* si procede al calcolo del coefficiente di dispersione intermareale (D) ricordando che:

$$D = \frac{1}{4} \frac{\Delta\sigma^2}{T}$$

dove $\Delta\sigma^2$ indica la differenza tra i quadrati degli scarti quadratici medi calcolati in due istanti diversi del processo dispersivo prodotto dal passaggio dell'onda di marea, in particolare tra l'istante iniziale e l'istante $t = 12$ ore.

Nelle situazioni in cui si sono ottenuti coefficienti di dispersione D negativi, dovuti al compattamento della macchia e non alla sua dispersione, si è scelto di sostituire al valore effettivo un valore positivo "fittizio" molto piccolo (10^{-10}) per poter rappresentare anche il contributo di queste macchie. Inoltre, in altri rari casi relativi ai punti posizionati nelle zone asciutte (prive di flussi di corrente), i coefficienti D risultati nulli sono stati anch'essi sostituiti con il valore "fittizio" 10^{-10} .

Data la grande variabilità del coefficiente di dispersione intermareale, una rappresentazione logaritmica è risultata più agevole, quindi tutta la trattazione (anche grafica) prende in considerazione il $\log_{10}(D)$ in luogo di D stesso.

Si riportano di seguito gli istogrammi del $\log_{10}(D)$ per i gruppi di macchie trattati nella sezione 7.4, i quali sono stati tutti sottoposti ad una marea caratterizzata da flesso crescente all'istante $t = 0$.

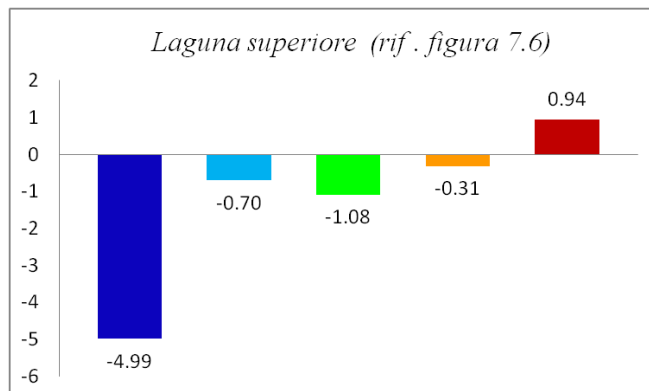


Figura 8.1: Valori del $\log_{10}(D)$ per la laguna superiore, immissione a marea crescente (livelli nulli)

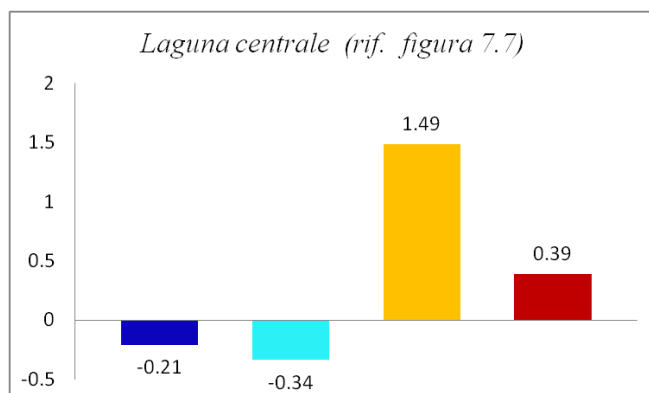


Figura 8.2: Valori del $\log_{10}(D)$ per la laguna centrale, immissione a marea crescente (livelli nulli)

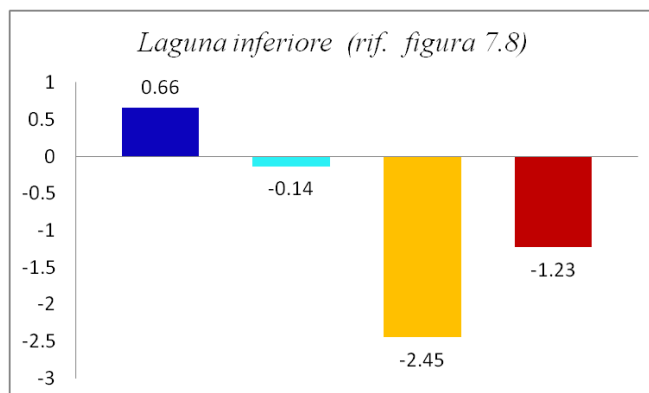


Figura 8.3: Valori del $\log_{10}(D)$ per la laguna inferiore, immissione a marea crescente (livelli nulli)

Dal momento che il coefficiente di dispersione è una misura della velocità di diffusione di una macchia qualsiasi, a maggiori valori del coefficiente di dispersione intermareale corrisponde una più elevata dispersione delle macchie. Il modello conferma le aspettative, infatti considerando la simulazione relativa alla laguna superiore (figura 7.6) si osserva che il più alto coefficiente risulta quello stimato per la macchia rossa, la quale si diffonde maggiormente. Anche la macchia arancione si distingue un poco essendo caratterizzata da un coefficiente D non molto piccolo rispetto a quelli propri delle altre tre macchie; però il coefficiente che più nettamente spicca per il suo basso valore è quello della macchia blu ($D = -4,99$) la quale rimane ferma nel tempo.

Analizzando i risultati ricavati per la simulazione riguardante la laguna centrale (figura 7.7) si trova il valore più elevato del coefficiente di dispersione per la macchia arancione, come previsto. Una diffusione comunque sostenuta ($D = 0,39$) contraddistingue la macchia rossa, mentre quelle blu e azzurra possiedono all'incirca lo stesso coefficiente in accordo con il risultato ottenuto tramite il modello *Lagrangiano*. Infine gli output ottenuti dallo studio della laguna inferiore (figura 7.8) confermano nuovamente le conclusioni precedenti: la macchia blu presenta il maggior coefficiente di dispersione seguita dalla macchia azzurra. Le altre particelle rosse e arancioni si muovono molto meno, in particolar modo quelle arancioni, contraddistinte da un coefficiente parecchio basso ($D = -2,45$), rimangono all'incirca nella stessa posizione per tutta la durata della simulazione.

Una rappresentazione del $\log_{10}(D)$ molto più interessante consiste nella compilazione di una mappa cromatica del dominio come già è stato fatto per la quota del fondale e i livelli.

Innanzitutto è stato creato un file `.xyz`¹, file di testo tipicamente usato in *Incidenze* per quotare le maglie di un dominio, contenente su tre colonne separate le coordinate x e y dei 1320 punti analizzati e il relativo valore del $\log_{10}(D)$ ottenuto dallo studio. A seguire, mediante apposita utility di *Incidenze*, si procede alla “quotatura” delle maglie del file `.geo` del dominio utilizzando i valori del coefficiente di dispersione intermareale.

Nelle figure 8.4 e 8.5 sono riportati un estratto del file di testo `.xyz` e una sua rappresentazione grafica in *Incidenze* dove la variabilità del $\log_{10}(D)$ è associata a una scala cromatica. Complessivamente sono stati compilati quattro files `.xyz`, contenenti separatamente i risultati delle quattro condizioni idrodinamiche coinvolte. In figura sono riportati ancora i risultati relativi al file `.out n° 1` (immissione al flesso crescente).

¹I files `.xyz` contengono tre colonne di valori reali rappresentativi delle coordinate x , y e z di una serie di punti quotati. Tali files sono utilizzabili, ad esempio, per costruire la base altimetrica (piano quotato) necessaria per attribuire le quote alle maglie triangolari del reticolo di calcolo. *Incidenze* è predisposto per consentire l'importazione di un elevato numero di punti `.xyz` (circa $15 \cdot 10^6$); può essere perciò utilizzato per visualizzare ed elaborare files che contengono nuvole di punti ottenute da rilievi topografici ad alta risoluzione.

laguna1901fase1.xyz - Blocco note			
File	Modifica	Formato	Visualizza ?
2304311.724		5007367.069	-2.067715238
2305579.607		5007296.239	-1.630818702
2303904.017		5007432.791	-1.64879258
2303661.312		5007498.018	-1.458812191
2304882.310		5007430.678	-1.419439553
2304122.025		5007510.866	-1.318478318
2304652.204		5007506.753	-1.081139828
2303870.216		5007612.137	-1.377017816
2304073.010		5007644.189	-1.298648872
2303212.443		5007802.579	-1.248151545
2303447.789		5007796.843	-1.235019626
2305539.819		5007711.791	-0.616831929
2302890.289		5007909.089	-0.973270738
2303761.335		5007891.380	-0.951034707
2304132.624		5007969.828	-0.880251064
2303430.951		5008045.657	-0.944678342

coordinata x
 coordinata y
 $\log_{10}D$

Figura 8.4: Estratto del file .xyz contenente i risultati relativi all'applicazione del .out n°1

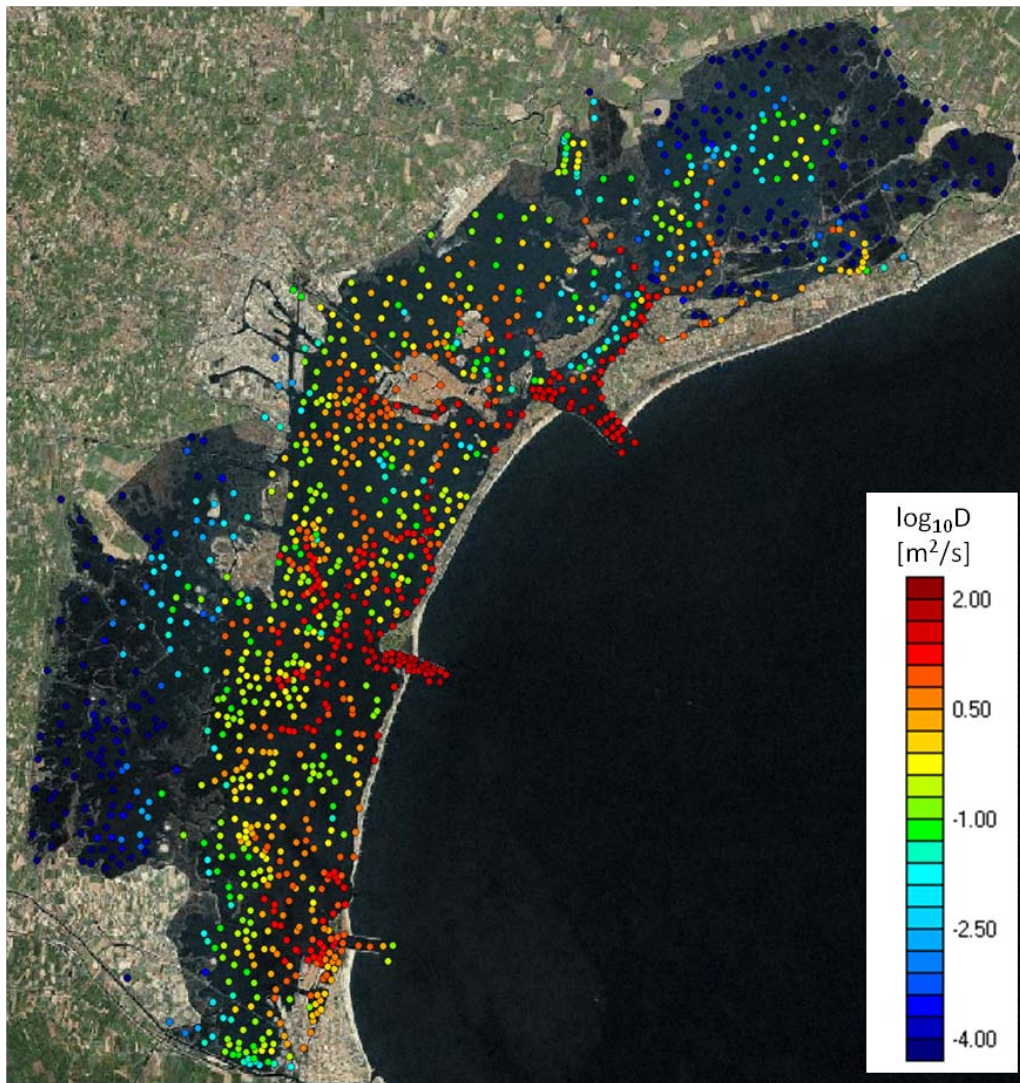


Figura 8.5: Rappresentazione cromatica del $\log_{10}D$ sui 1320 punti analizzati (file .out n°1)

I 1320 punti di interesse, di gran lunga inferiori in numero alle maglie utilizzate per riprodurre la laguna, non permettono di coprire uniformemente tutto il dominio; per assicurare che ad ogni maglia sia assegnato un valore di D si procede con le seguenti operazioni, tutte eseguite in ambiente *Incidenze* tramite l'utilizzo di strumenti software dedicati².

- Assegnazione diretta di D alle 1320 maglie su cui sono posizionate le macchie oggetto di studio, attraverso lo strumento *quota .geo da .xyz*³.
- Creazione di un file *.tin* a partire dall' *.xyz* utilizzando lo strumento *crea .tin da .xyz*⁴. Questo tipo di file contiene una discretizzazione spaziale, tramite elementi triangolari, dello spazio occupato dai punti definiti nell' *.xyz*, che costituiscono anche i vertici dei triangoli. Questa costruzione geometrica ha la caratteristica fondamentale di operare una variazione lineare del valore del parametro registrato come coordinata z , in questo caso il logaritmo del coefficiente di dispersione intermareale, lungo i lati degli elementi, a partire ovviamente dai valori estremi, noti, assegnati ai vertici. Il file *.tin*, operando per interpolazione dei valori conosciuti, contiene informazioni su D sufficienti a garantire una buona copertura di tutta l'area lagunare.
- “Quotatura” a partire dai dati contenuti nel *.tin* delle maglie del dominio (la maggior parte) cui non sia già stato assegnato un valore del $\log_{10}(D)$, operazione effettuata con l'apposito strumento *quota .geo da .tin*⁵.
- A questo punto, sfruttando il comando *tappabuchi*,⁶ si quotano anche le maglie non quotate posizionate ai margini del dominio considerato.
- Infine, con l'utilizzo dell' utility *quote nodali da maglie*⁷ si procede alla quotatura dei nodi a partire dalle maglie.

Una volta ultimate le operazioni descritte il risultato fornisce una copertura completa e continua su tutto il territorio lagunare del parametro in questione, in una rappresentazione sintetica, chiara ed efficace delle caratteristiche del bacino.

²Il menu utility fornisce una serie di comandi utili per effettuare delle operazioni sui files caricati da *Incidenze*. Tra queste le più importanti sono la creazione del reticolo di calcolo a partire da punti sparsi (*xyz*) o da poligoni (*cnt*), e la quotatura delle maglie del file *.geo* a partire da punti sparsi (*xyz*) o da un modello altimetrico a maglie triangolari (*tin*).

³Questo comando, se sono disponibili un file *.xyz* e un file *.geo*, assegna a ciascuna maglia del file *.geo*, come quota del fondo h_f , la media delle quote dei punti *.xyz* che cadono all'interno della maglia stessa. Tramite una finestra di dialogo è possibile scegliere se quotare tutte le maglie o soltanto quelle caratterizzate da $h_f = -999$.

⁴Attivando questo comando il programma genera il file *.tin* a partire dal file *.xyz* caricato. A tale scopo il programma utilizza un metodo basato sul criterio di Delaunay per generare i triangoli appoggiandosi a tutti i punti del file *.xyz*.

⁵Questo comando, se sono disponibili un file *.tin* e un file *.geo*, assegna a ciascuna maglia del file *.geo*, come quota del fondo h_f , la quota calcolata sulla base del *tin* in corrispondenza del centro della maglia stessa. Tramite una finestra di dialogo è possibile scegliere se quotare tutte le maglie o soltanto quelle caratterizzate da $h_f = -999$.

⁶Con questo comando, attivo quando è caricato un file *.geo*, è possibile attribuire alle maglie non quotate ($h_f = -999$) le quote delle maglie adiacenti. Si può scegliere se quotare in questo modo le maglie non quotate che hanno tre, due o una sola maglia quotata adiacente.

⁷Questo comando assegna ai nodi del file *.geo* le quote z determinate da un'interpolazione lineare sulle quote delle maglie che convergono nel generico nodo. È possibile scegliere se quotare tutti i nodi o soltanto quelli la cui quota vale -999.

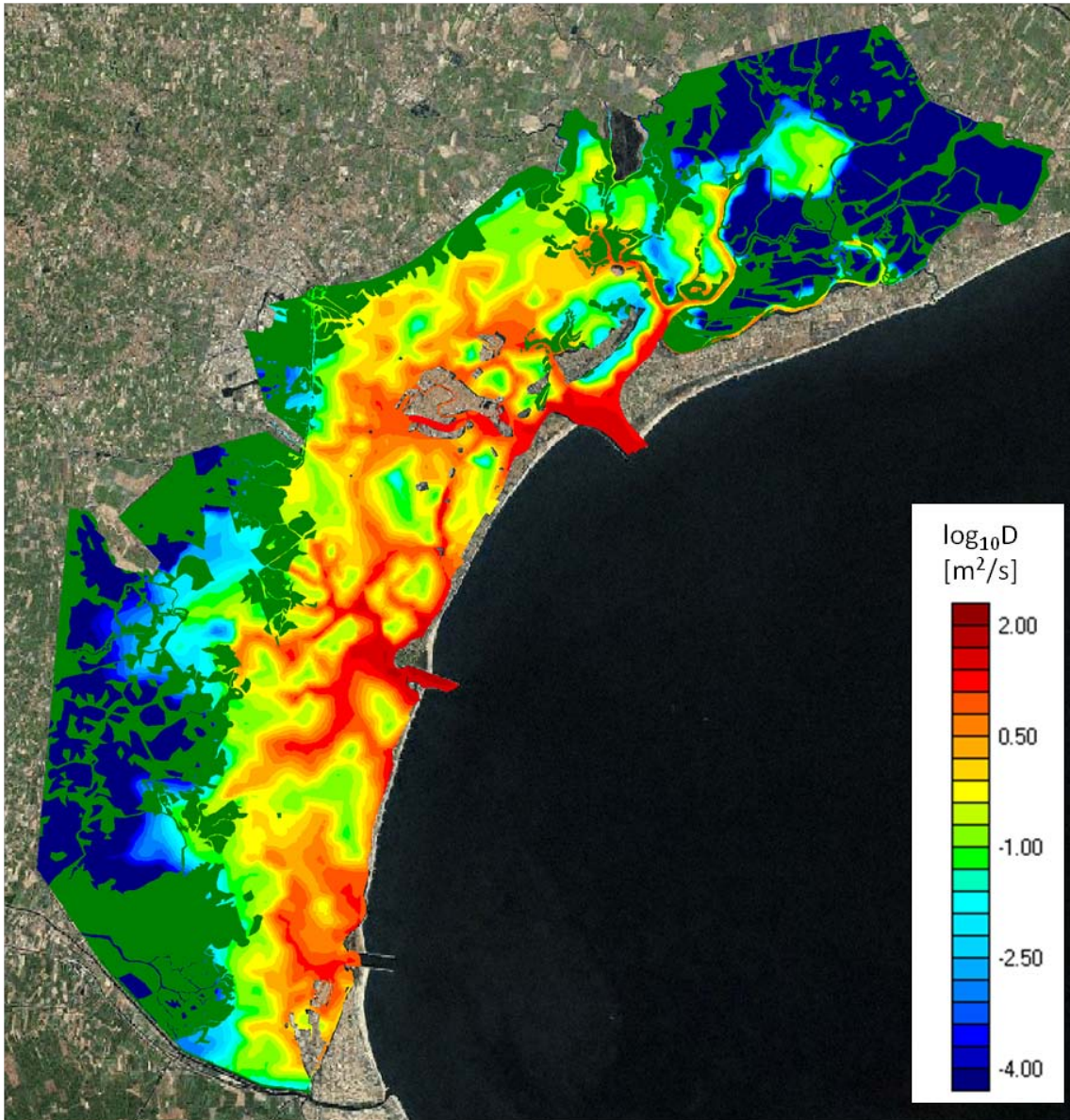


Figura 8.6: Rappresentazione cromatica del $\log_{10}(D)$ sul dominio lagunare (file .out n°1)

8.2 COEFFICIENTE DI DISPERSIONE INTERMAREALE MEDIO

Quanto esposto finora in termini di risultati fa riferimento, come già detto, a uno soltanto dei quattro casi di studio presi in considerazione e, in particolare, alle simulazioni condotte sul file .out n°1 relativo ad un'onda sinusoidale di marea che si manifesta con flessa in fase crescente all'istante $t = 0$.

Il fatto di applicare allo studio della dispersione condizioni idrodinamiche ottenute dalla medesima onda di marea ma con sfasamenti temporali di tre ore l'una dall'altra (come già illustrato nella sezione 7.2), ha lo scopo di simulare gli effetti diversi prodotti da versamenti di soluto in laguna in momenti differenti dello sviluppo dell'onda. Se il file .out n°1, fin qui preso in considerazione, riproduce un'immissione di tracciante durante la fase di crescita della marea, in condizioni di livello nullo, i restanti files n°2, n°4 e n°3 simulano immissioni rispettivamente al passaggio del colmo (livello massimo), del cavo (livello minimo) e del flesso (a livello nullo e in calo) dell'onda.

Si possono analizzare le differenze che, per le stesse macchie, si producono al variare del momento di immissione, infatti le rappresentazioni riportate nelle figure seguenti, per un'immissione al colmo (file n°2) e al cavo (file n°4), dipingono situazioni evidentemente diverse. Le macchie in questione sono quelle individuate nella laguna centrale e inferiore, il cui comportamento, al regime idraulico definito dal file n°1, è già stato illustrato nelle figure 7.7 e 7.8.

Si è compiuta questa scelta, evitando di riportare anche le variazioni della dispersione relativa alle particelle posizionate nella laguna superiore, in quanto i risultati che si ottengono in quest'ultimo caso sono meno chiari e immediati e non forniscono ulteriori spunti interessanti di riflessione.

Innanzitutto si analizza la figura 8.7 raffigurante la dispersione delle particelle nella laguna centrale dall'istante di immissione alla 12^a ora di simulazione con scatti fotografici ogni tre ore. L'immissione al colmo comporta che nelle prime sei ore, mentre i livelli si abbassano, le macchie siano costantemente sottoposte all'azione delle correnti in uscita attraverso la bocca di Malamocco. L'azione di richiamo verso l'esterno è sufficiente a riversare in mare buona parte delle particelle costituenti la macchia arancione le quali, una volta richiamate nuovamente entro i confini lagunari, finiscono per disperdersi nel bacino. Le restanti macchie (blu, rossa e azzurra), invece, sono tutte abbastanza distanti dalla bocca da non risentire particolarmente dell'intenso campo di correnti che si viene a creare: nelle 12 ore si muovono in modo abbastanza compatto, deformandosi, ma senza disperdersi molto.

Confrontando i risultati appena descritti con quelli visibili nella figura 8.8, che rappresenta sempre le stesse quattro macchie immesse però al momento del cavo dell'onda di marea, si osservano comportamenti differenti e non trascurabili. Infatti le particelle, con l'immissione al cavo, per le prime sei ore vengono sospinte verso la parte interna del bacino dalle correnti in ingresso in laguna (in particolar modo quelle arancioni, le altre invece, in queste prime ore, sono caratterizzate da una dispersione molto ridotta), mentre durante la fase di abbassamento dei livelli, partendo da posizioni ora abbastanza defilate, risentono limitatamente delle correnti in uscita e faticano a trovare la via del mare. Alla 12^a ora soltanto la macchia arancione ha attraversato la bocca di Malamocco ma, rispetto alla dispersione osservabile nella situazione precedentemente esposta (figura 8.7), il fenomeno è molto meno significativo. La macchia azzurra possiede un comportamento singolare rispetto al resto del gruppo, infatti presenta una dispersione più pronunciata con l'immissione al cavo, probabilmente per l'irregolarità del fondale e per la sua particolare posizione.

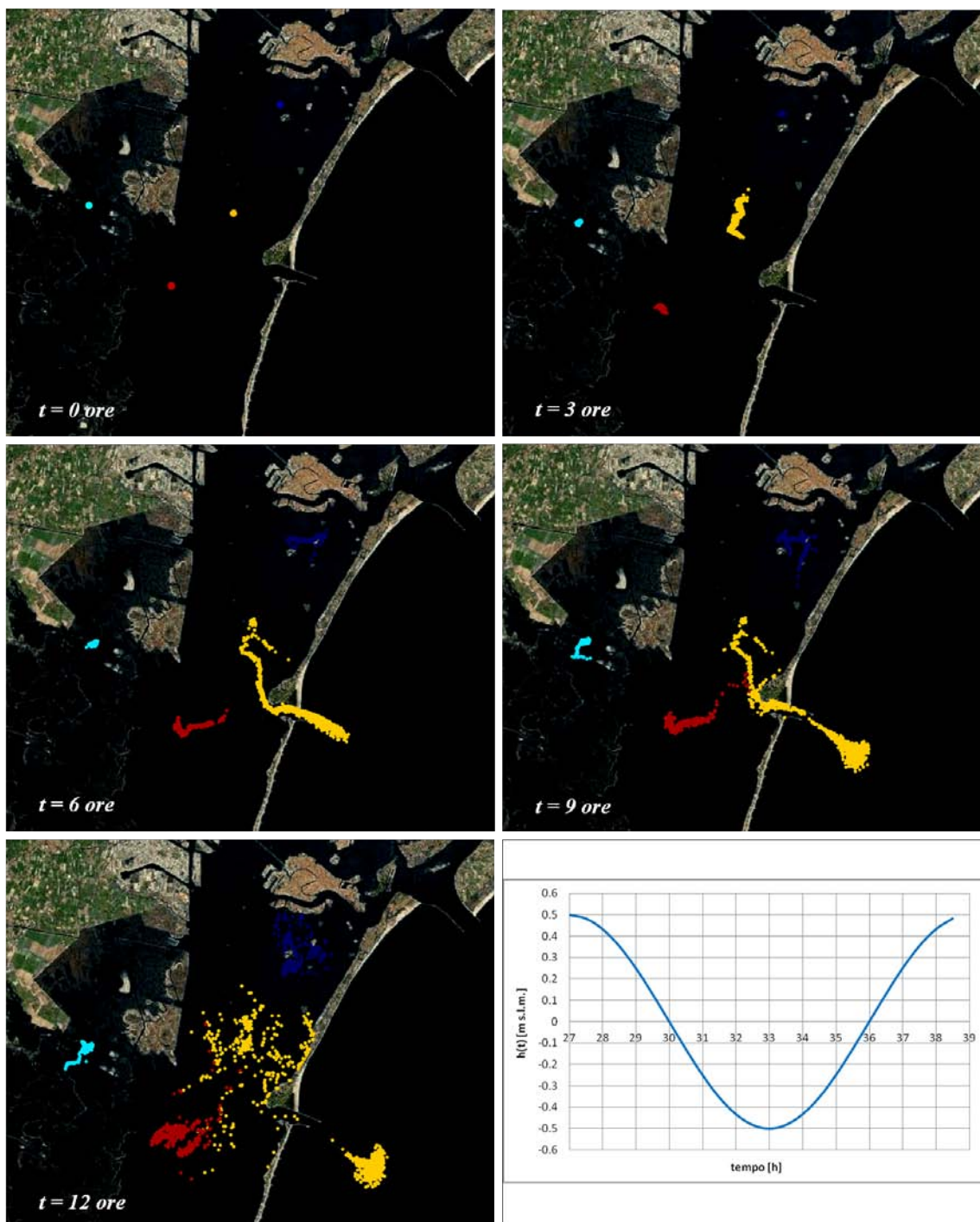


Figura 8.7: Laguna centrale, dispersione con immissione al colmo (livelli massimi)

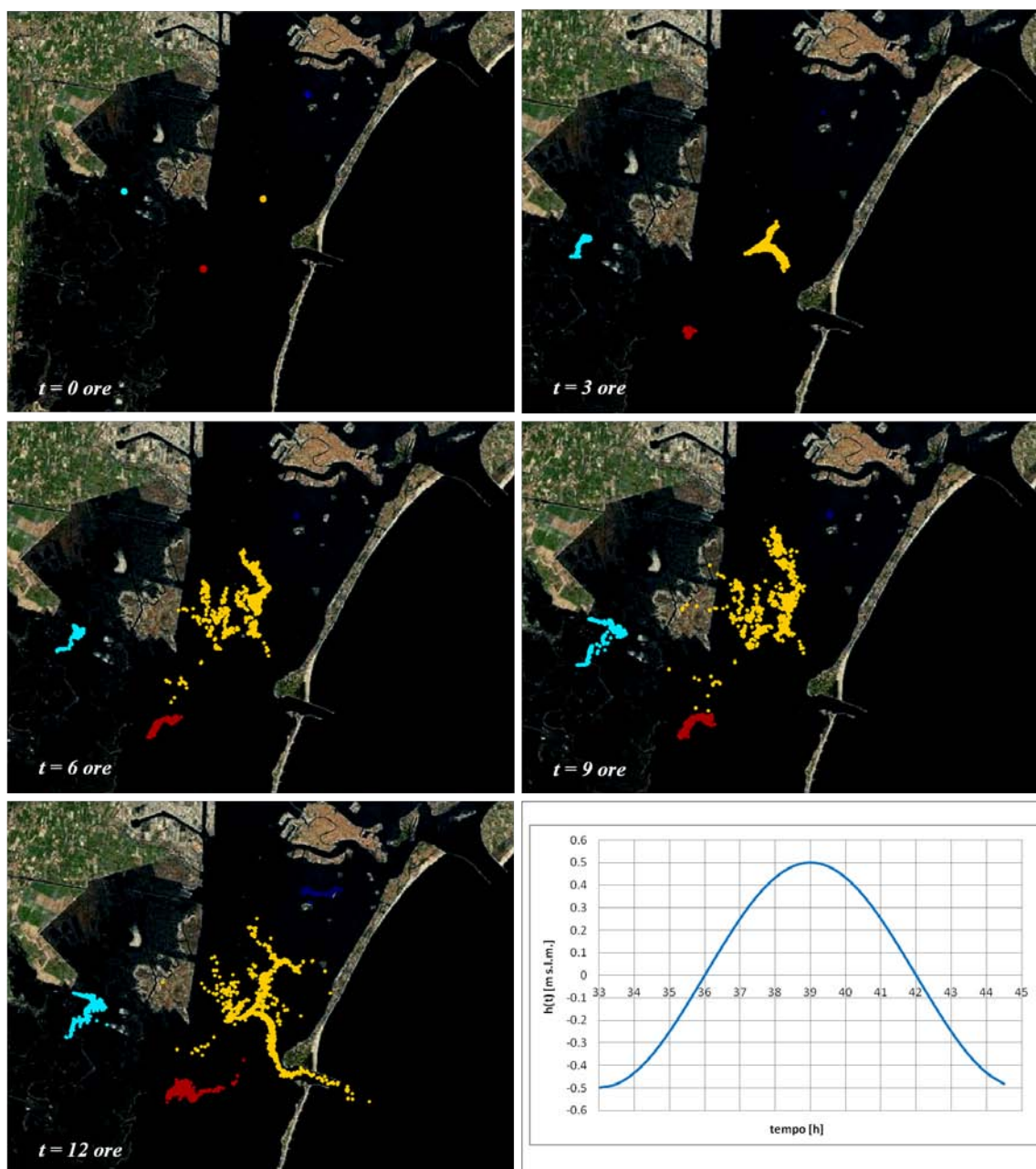


Figura 8.8: Laguna centrale, dispersione con immissione al cavo (livelli minimi)

Nelle figure 8.9 e 8.10 è possibile osservare la dispersione delle particelle nella laguna centrale, rispettivamente con immissione al colmo e al cavo, dall'istante di immissione alla 72^a ora di simulazione con scatti fotografici ogni 24 ore.

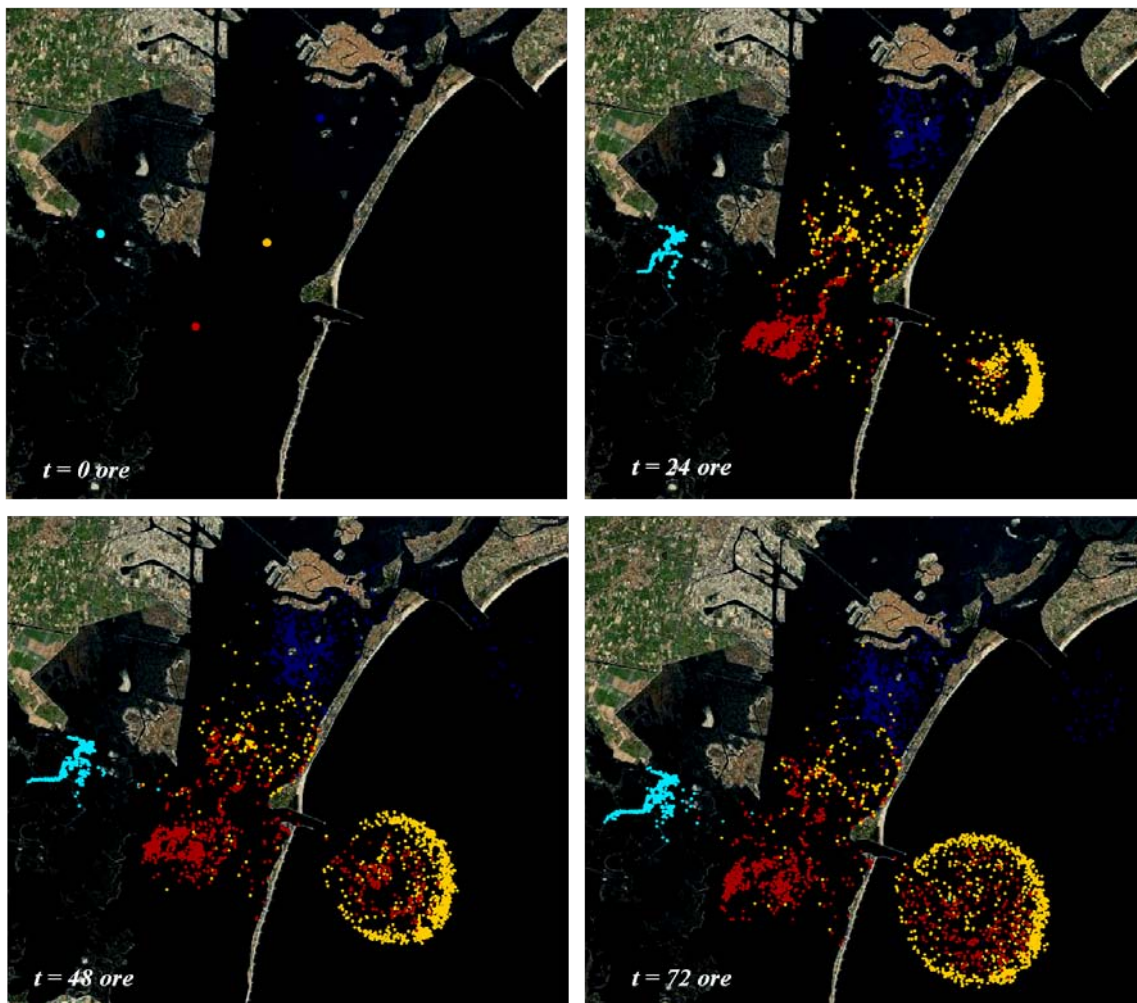


Figura 8.9: Laguna centrale, dispersione con immissione al colmo (livelli massimi)

Si constata, come previsto, che le particelle iniettate alla 27^a ora, quando l'acqua sta uscendo dalla laguna diminuendo i tiranti (figura 8.9), si diffondono maggiormente rispetto a quelle rilasciate alla 33^a (figura 8.10). Si osserva infatti un'elevata dispersione già alla 24^a ora non soltanto per le particelle arancioni, molte delle quali si diffondono in mare aperto, ma anche per le rosse e le blu. Questo fatto è confermato anche dai valori dei coefficienti di dispersione intermareale relativi alle due situazioni analizzate, riportati nei grafici di figura 8.11 e 8.12. Si nota anche la grande "attività" della bocca di Malamocco di gran lunga superiore a quella della bocca di Lido: al termine della simulazione la maggior parte delle particelle arancioni ha attraversato la bocca centrale abbandonando la laguna.

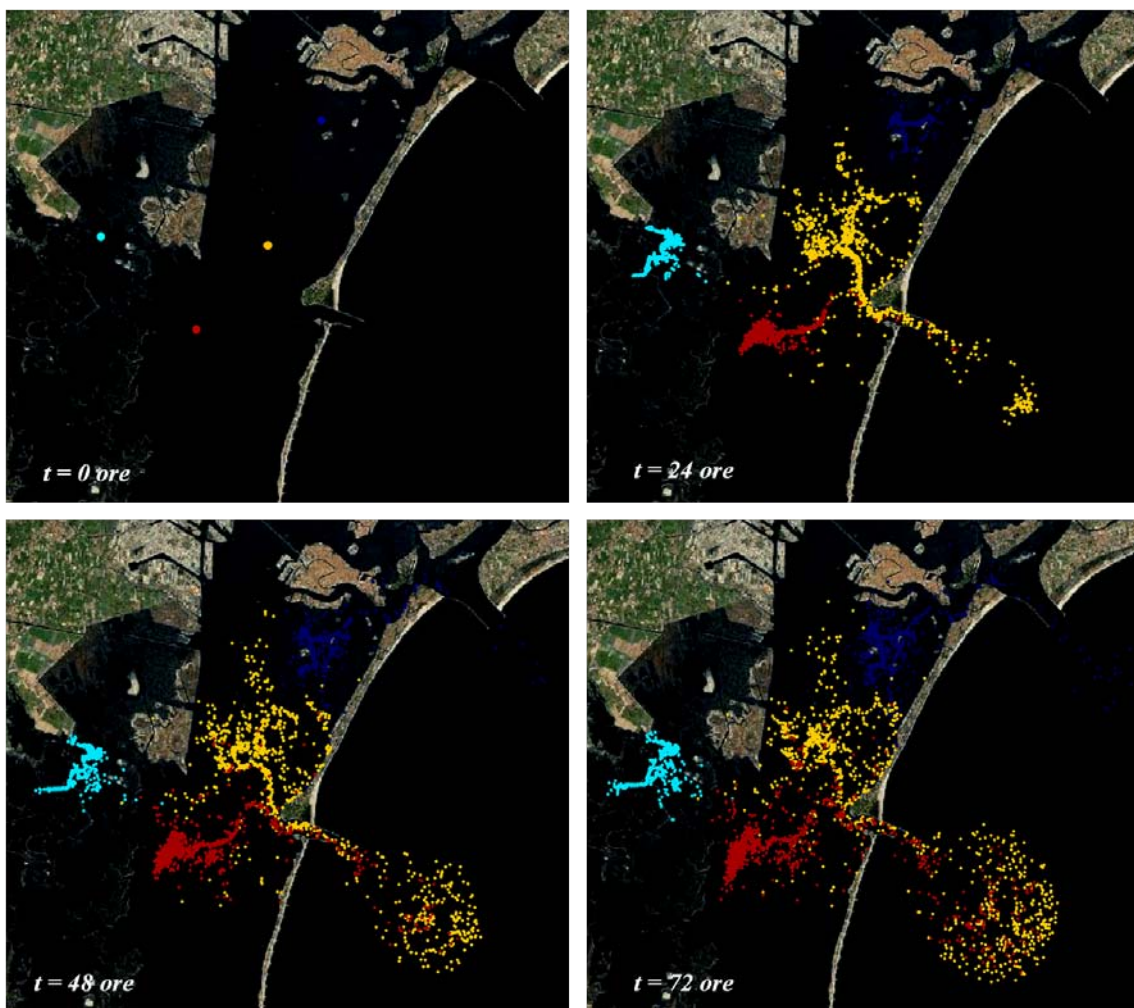


Figura 8.10: Laguna centrale, dispersione con immissione al cavo (livelli minimi)

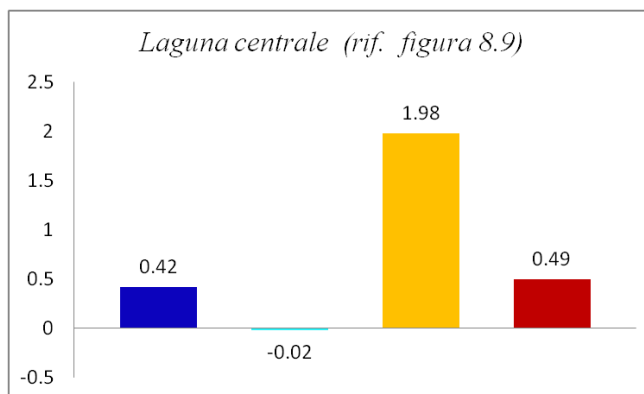


Figura 8.11: Valori del $\log_{10}(D)$ per le macchie della laguna centrale, immissione al colmo (livelli massimi)

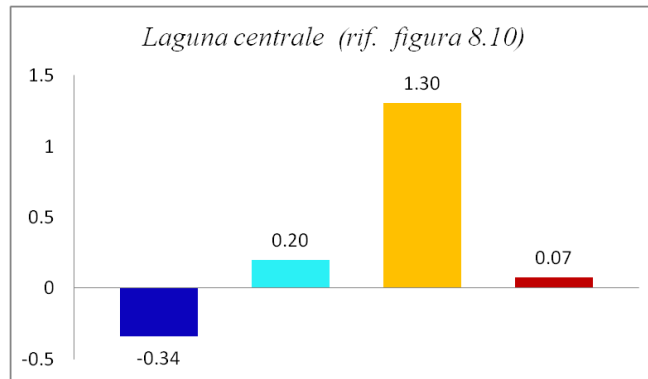


Figura 8.12: Valori del $\log_{10}(D)$ per le macchie della laguna centrale, immissione al cavo (livelli minimi)

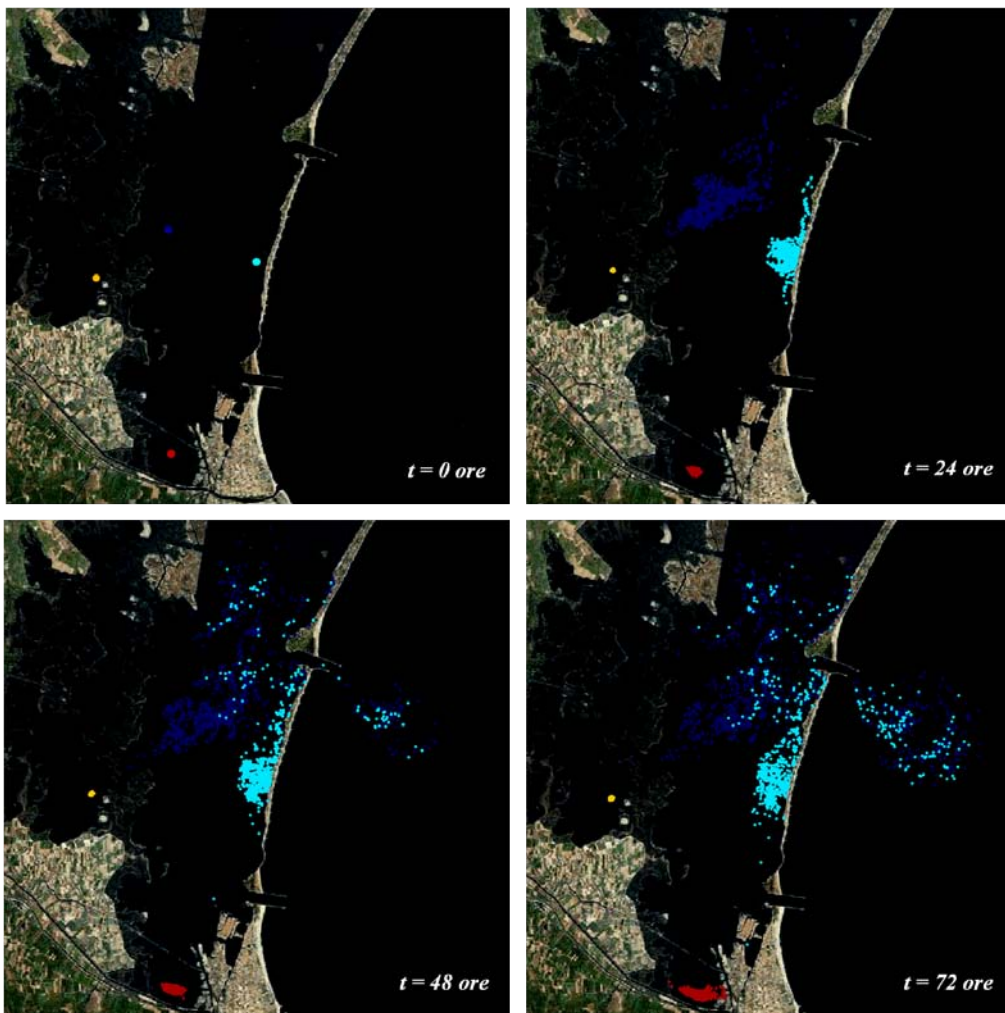


Figura 8.13: Laguna inferiore, dispersione con immissione al colmo (livelli massimi)

Nelle figure 8.13 e 8.14 è possibile osservare la dispersione delle particelle nella laguna inferiore, rispettivamente con immissione al colmo e al cavo, dall'istante di immissione alla 72^a ora di simulazione con scatti fotografici ogni 24 ore.

Ci si accorge, ancora una volta, che le particelle iniettate alla 27^a ora, (figura 8.13), si diffondono maggiormente rispetto a quelle rilasciate alla 33^a (figura 8.14). Si nota infatti una dispersione abbastanza cospicua, già alla 24^a ora, soprattutto per le particelle blu che si allontanano dalla posizione di partenza verso la laguna centrale; le differenze si possono riscontrare confrontando anche le immagini riferite all'ultima ora di simulazione quando parecchie particelle, sia blu che azzurre, oltrepassano la bocca di Malamocco e si diffondono in mare. Questo fatto è confermato anche dai valori dei coefficienti di dispersione intermareale relativi alle due situazioni analizzate, riportati nei grafici di figura 8.15 e 8.16.

C'è da dire, però, che le diversità nella dispersione considerando le macchie posizionate nella laguna inferiore sono meno rilevanti rispetto a quelle osservate nella laguna centrale.

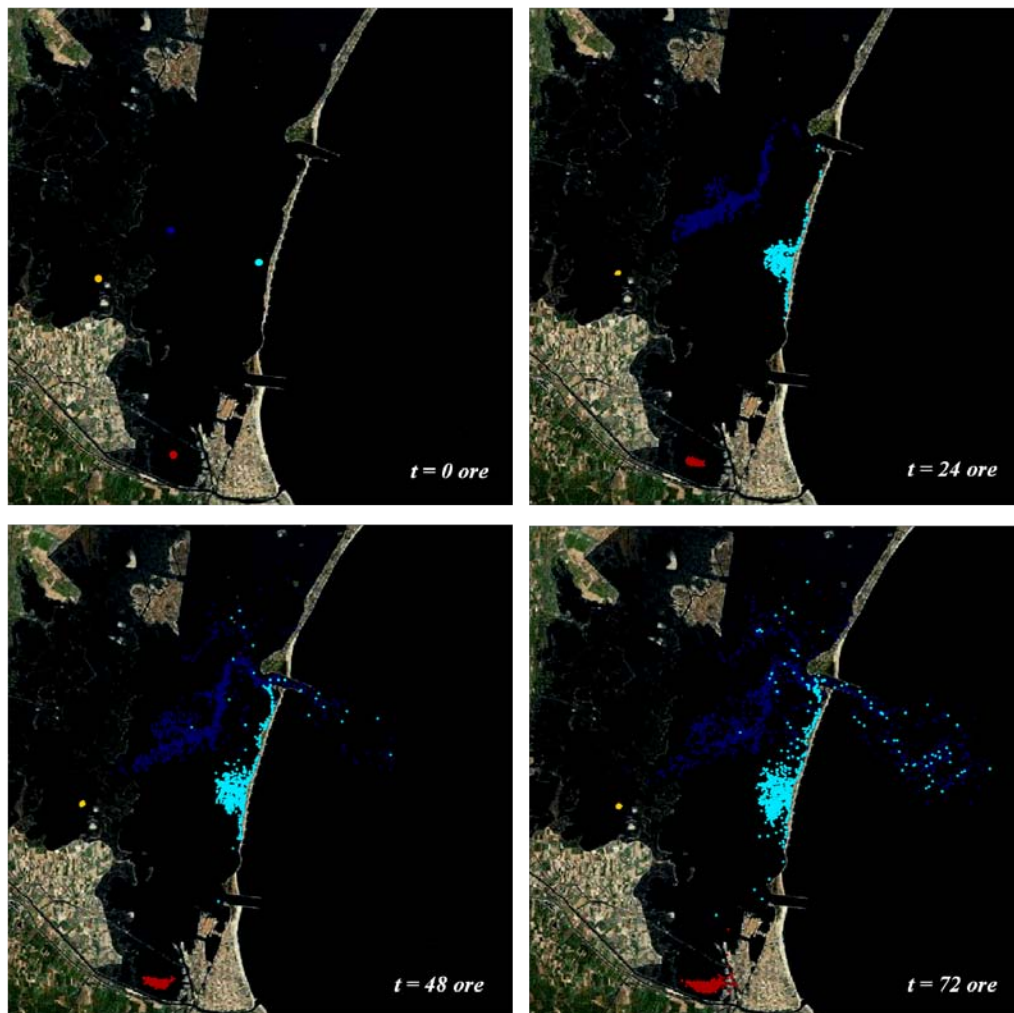


Figura 8.14: Laguna inferiore, dispersione con immissione al cavo (livelli minimi)

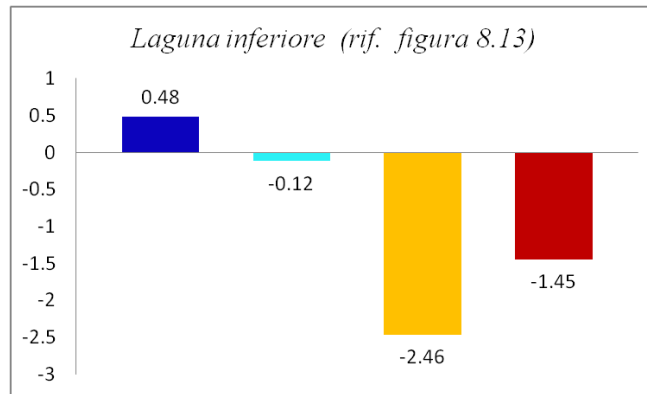


Figura 8.15: Valori del $\log_{10}(D)$ per le macchie della laguna inferiore, immissione al colmo (livelli massimi)

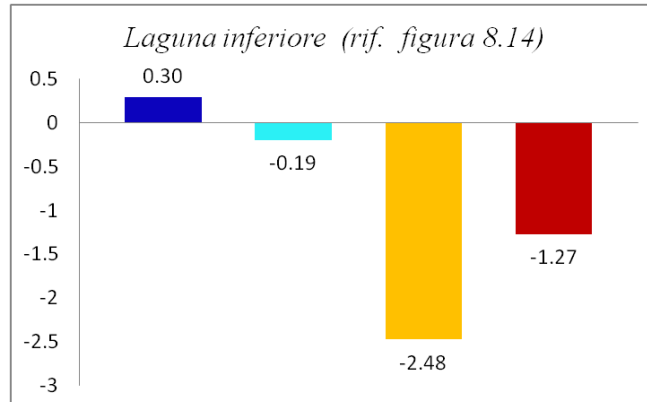


Figura 8.16: Valori del $\log_{10}(D)$ per le macchie della laguna inferiore, immissione al cavo (livelli minimi)

Il momento di immissione gioca quindi un ruolo decisivo sulle modalità e sull'entità del fenomeno dispersivo, determinando, a seconda della zona, destini anche parecchio diversi per le concentrazioni di soluto analizzate. Da qui la necessità di studiare il fenomeno caso per caso per ognuno dei quattro istanti "notevoli" nel passaggio dell'onda. Le successive figure dalla 8.17 alla 8.20 ripropongono la rappresentazione del $\log_{10}(D)$ in scala cromatica per le diverse condizioni di immissione.

Per avere un unico parametro che riassume la capacità dispersiva nell'intero periodo, si è calcolata la media aritmetica dei valori di D ottenuti dalle quattro simulazioni per ogni punto studiato. La rappresentazione D_{medio} , sempre in termini di logaritmo, è proposta in figura 8.21.

Le mappe tematiche che seguono evidenziano il concetto per cui, indipendentemente dall'istante di immissione, le zone dove si riscontrano i massimi e minimi relativi del $\log_{10}(D)$ rimangono approssimativamente le stesse e dipendono in modo molto esplicito dalla distanza dalle bocche di ingresso in laguna.

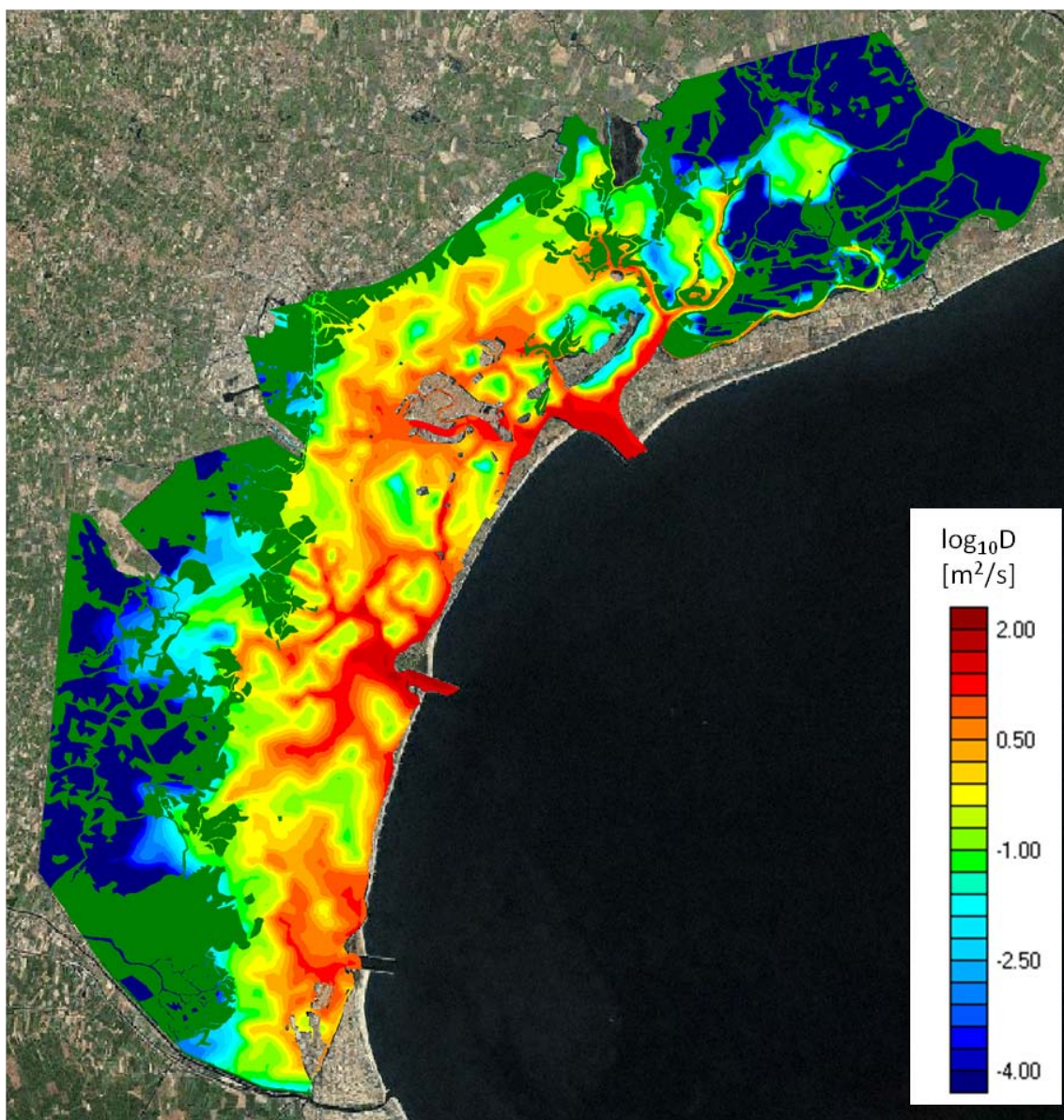


Figura 8.17: Rappresentazione cromatica del $\log_{10}(D)$, immissione al flesso crescente (file .out n°1)

Come previsto, i valori più alti del coefficiente di dispersione si trovano in prossimità delle tre bocche, infatti in tali aree i canali principali possiedono velocità piuttosto elevate e di conseguenza incrementano la diffusione delle particelle. Spostandosi invece verso i margini interni della laguna si osserva una progressiva riduzione del coefficiente, in particolare, le zone appartenenti alla laguna superiore e quelle a sud-ovest (dove la presenza delle barene non è irrilevante) sono caratterizzate da coefficiente di dispersione molto inferiore. Mentre le superfici prossime alle città di Venezia e Chioggia possiedono valori di dispersione abbastanza alti.

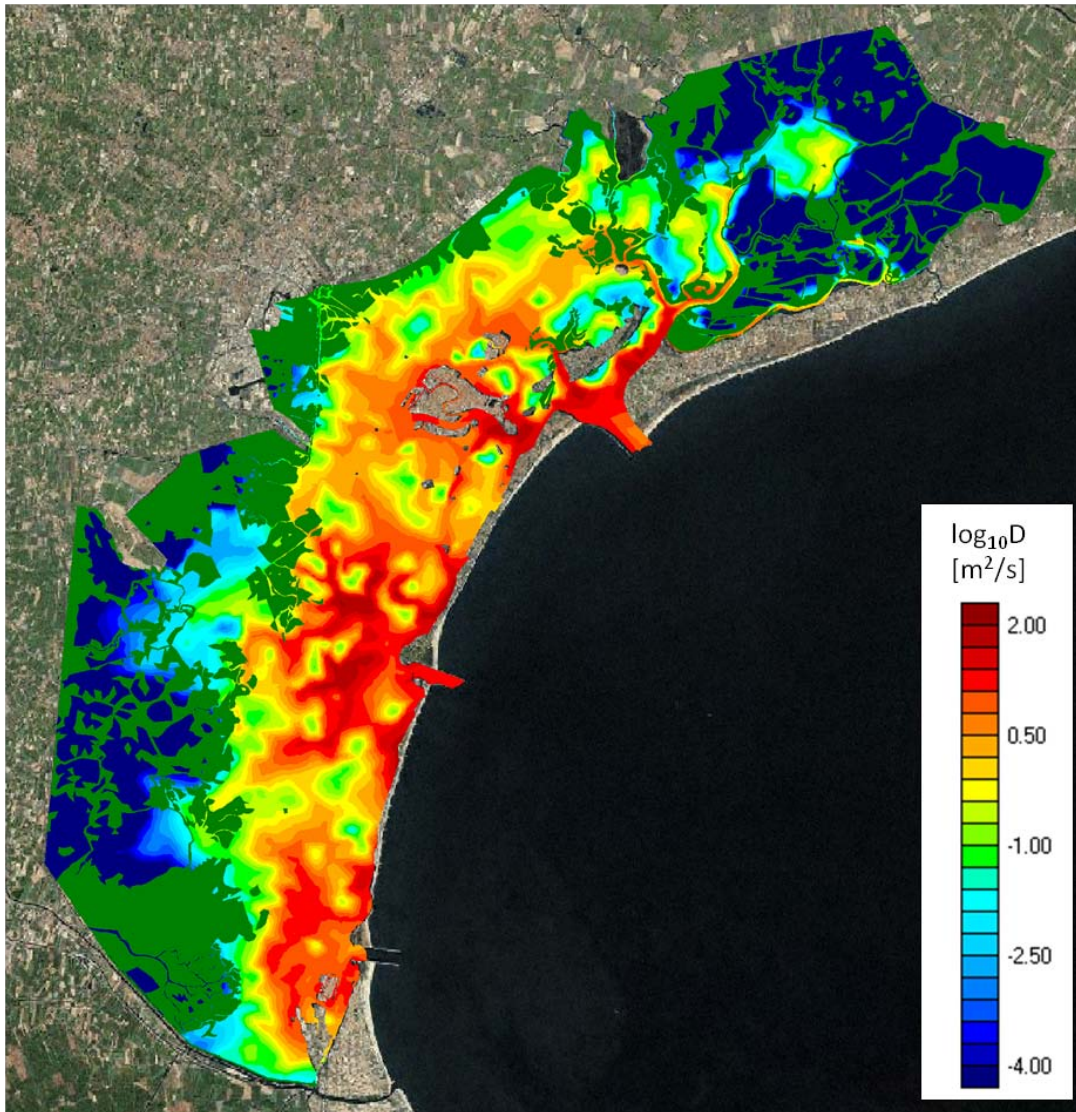


Figura 8.18: Rappresentazione cromatica del $\log_{10}(D)$, immissione al colmo (file .out n^o2)

Al variare dell'istante di immissione del tracciante si assiste a una variazione abbastanza uniforme dei valori del $\log_{10}(D)$ su tutto il dominio, in modo tale che i profili delle curve di livello rimangono grossomodo immutati. Le aree prossime alle tre bocche lagunari sono sempre caratterizzate da alti valori di dispersione, mentre nelle zone più periferiche del bacino, lontane da esse, le particelle possiedono coefficienti di dispersione molto inferiori. Pertanto la diffusione dei soluti è più elevata laddove sono maggiori le correnti e la vicinanza ai canali principali; ne consegue una miglior qualità dell'acqua rispetto a quella presente nelle aree marginali della laguna.

I valori massimi di dispersione si realizzano con immissione in condizione di massimo livello (figura 8.18), quando l'azione di riflusso delle correnti verso il mare investe le macchie ancora nella loro posizione iniziale. La possibilità per le particelle di giungere in prossimità delle bocche

d'ingresso comporta ottime probabilità di andare incontro a una buona dispersione. I minori valori del coefficiente di dispersione intermareale riguardano, al contrario, l'immissione al cavo (figura 8.20) che, producendo un iniziale schiacciamento delle macchie verso i confini interni della laguna, ne limita o compromette il successivo avvicinamento alle bocche durante la fase di marea calante.

L'immissione ai flessi produce risultati abbastanza simili in termini di D e intermedi tra le due situazioni estreme appena citate, anche in questa circostanza, tuttavia, con valori tendenzialmente minori per marea in crescita (figura 8.17), cioè in corrispondenza dell'ingresso del flusso in laguna con conseguente incremento delle velocità nell'intero dominio.

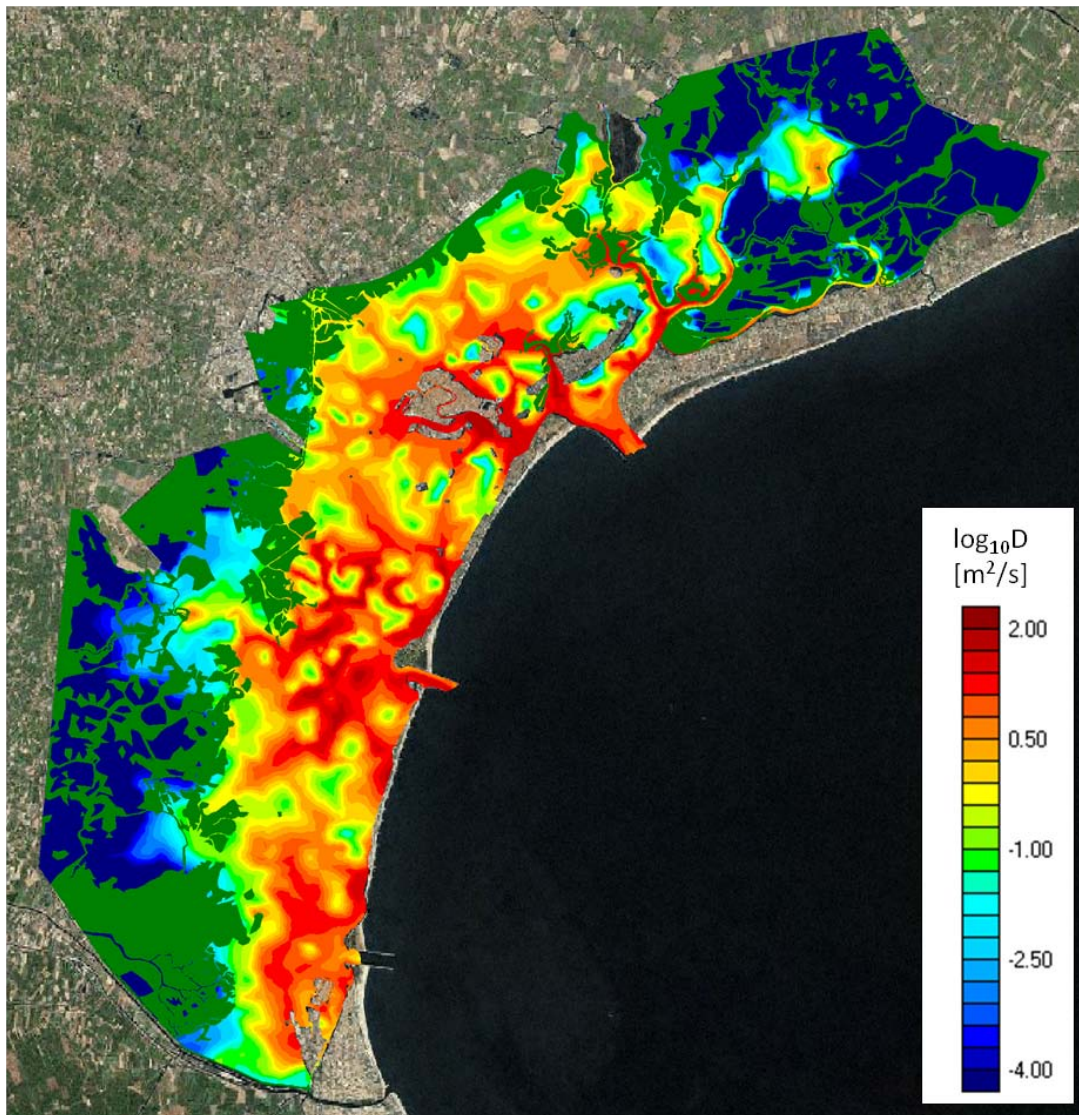


Figura 8.19: Rappresentazione cromatica del $\log_{10}(D)$, immissione al flesso calante (file .out n°3)

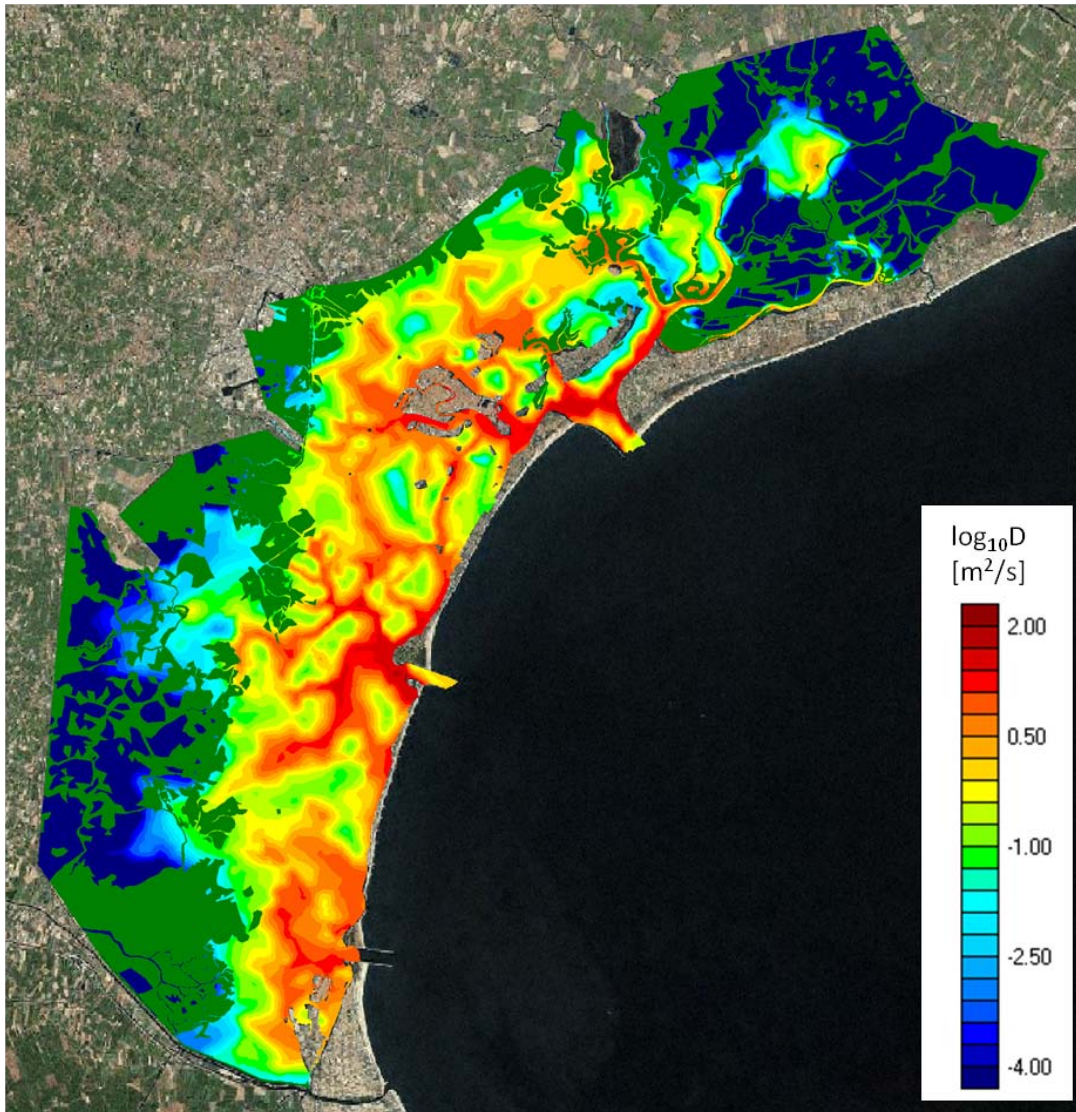


Figura 8.20: Rappresentazione cromatica del $\log_{10}(D)$, immissione al cavo (file .out n°4)

Facendo la media aritmetica⁸ dei valori del $\log_{10}(D)$ ottenuti dalle quattro diverse simulazioni, si ottiene il valor medio del logaritmo di D.

La raffigurazione del $\log_{10}(D_{medio})$, riportata in figura 8.21, consente una lettura d'insieme della laguna di Venezia, svincolata dalle problematiche legate ai tempi di immissione, certamente approssimativa ma comunque molto significativa in relazione alle finalità dello studio. Produce una rappresentazione chiara ed efficace della capacità di ricambio idrico legata alle condizioni idrodinamiche innescate dalla marea, che permette di esprimersi in relazione allo stato di salute delle varie zone della laguna.

⁸La media aritmetica viene calcolata sommando i diversi valori a disposizione (x_i), i quali vengono divisi per il loro numero complessivo (n): $M_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

La distribuzione del coefficiente medio di dispersione intermareale ha lo stesso andamento generale raffigurato nelle precedenti quattro immagini già descritte. Si vede chiaramente il contributo, a vantaggio della dispersione, fornito dall'ampia rete di canali che partendo dalle tre bocche si ramifica verso le zone più interne della laguna; all'elevato grado del ricambio idrico presente in gran parte del bacino si contrappone la quasi totale assenza di dispersione nella parte più a nord e in quella a sud-ovest, caratterizzate rispettivamente dalla presenza di valli da pesca e di barene.

Si osserva inoltre la maggiore attività delle bocche di Malamocco e di Lido rispetto a quella di Chioggia: ciò è dovuto principalmente alle diverse profondità possedute dai canali che da esse dipartono e di conseguenza alle differenti velocità delle correnti che in essi scorrono.

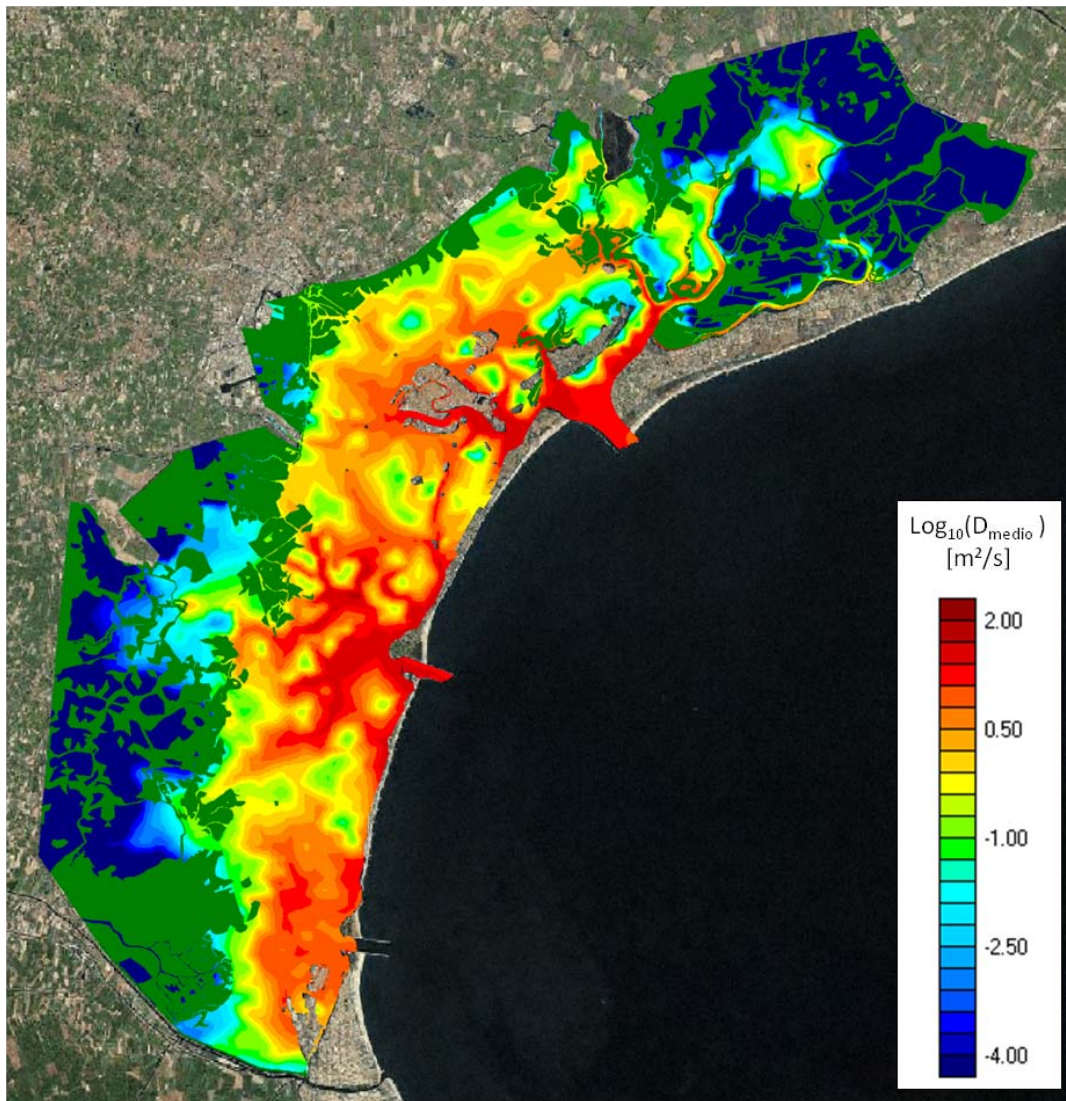


Figura 8.21: Rappresentazione cromatica del $\log_{10}(D_{medio})$

Per analisi di dettaglio sulla dispersione e il comportamento dei soluti in condizioni specifiche

è bene rifarsi ad un calcolo puntuale così come effettuato per ognuno dei punti presi in esame nel presente studio.

Al di là delle differenze che emergono al variare delle condizioni di immissione, l'analisi insegna che uno stesso valore di D , in punti diversi del dominio, può essere il risultato di un'evoluzione delle macchie molto diversa. Una dispersione uniforme delle particelle nello spazio o la divisione della concentrazione originaria in due masse compatte in allontanamento progressivo l'una dall'altra, possono portare allo stesso risultato analitico, segno che molte informazioni, potenzialmente interessanti ad un livello di analisi più spinta, si perdono e che anche D presenta limiti nella capacità di descrivere compiutamente il fenomeno dispersivo.

8.3 VELOCITÀ RESIDUE

Nelle quattro figure seguenti, 8.22 8.23 8.24 e 8.25, sono rappresentate le velocità residue delle 1320 macchie posizionate nella laguna di Venezia, ottenute dalle quattro diverse condizioni idrodinamiche analizzate.

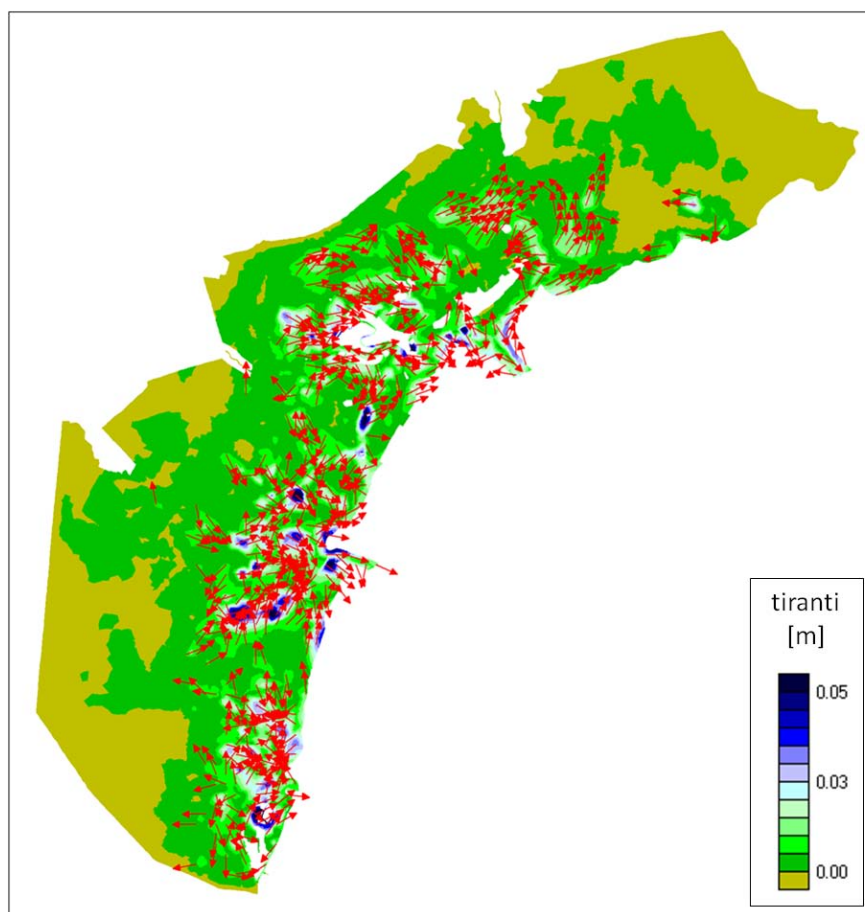


Figura 8.22: Velocità residue delle macchie, immissione al flesso crescente (file .out n°1)

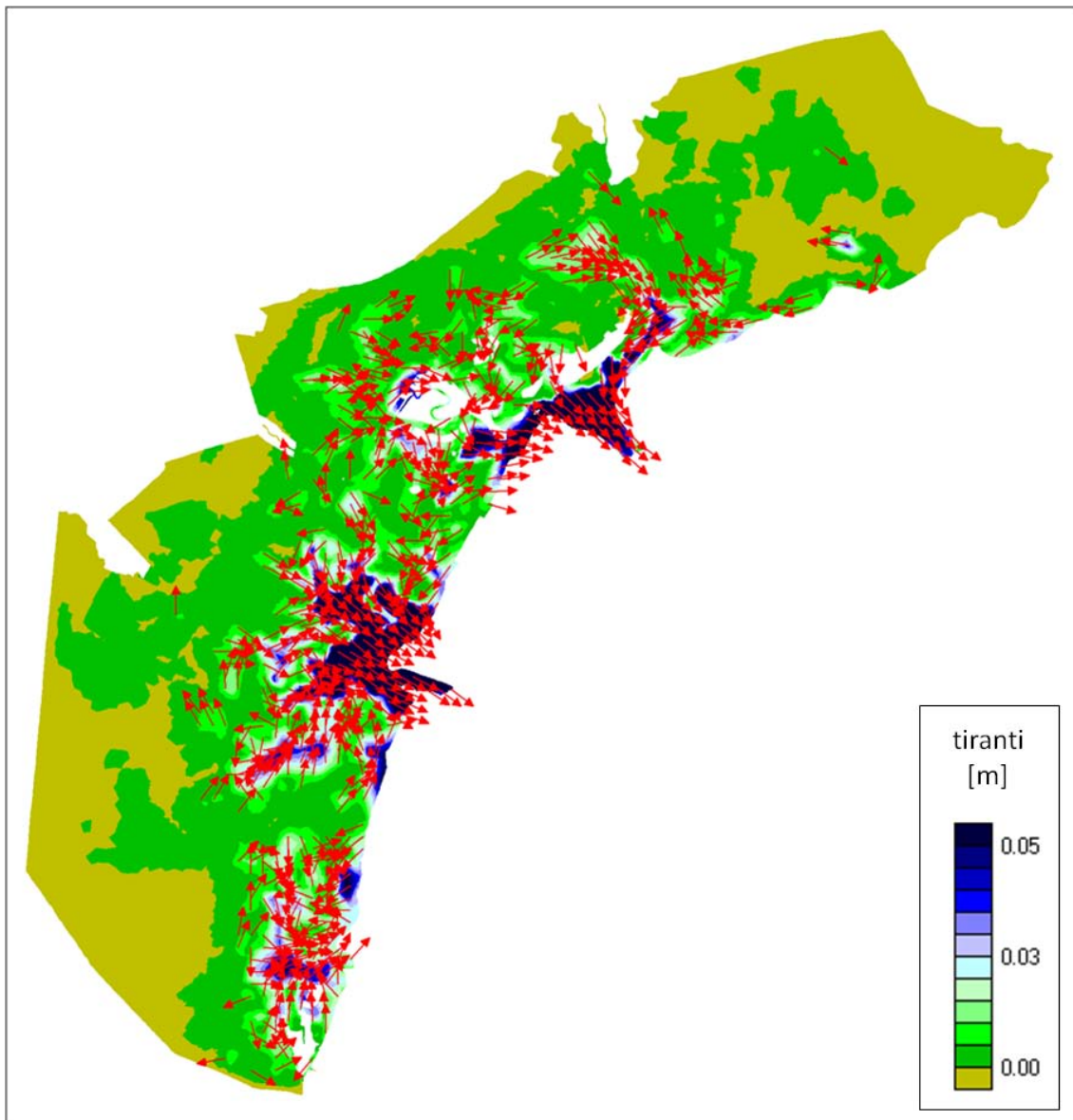


Figura 8.23: Velocità residue delle macchie, immissione al colmo (file .out n°2)

Per ricavare ciascuna rappresentazione è stato utilizzato un programmino che, richiedendo in input due file .geo quotati rispettivamente con i valori delle velocità residue in direzione x e y, fornisce in output un file .bup.

Nello specifico i passaggi compiuti sono stati:

- creazione di due file .xyz necessari per quotare le maglie del dominio, contenenti sulle tre colonne separate le coordinate x e y dei 1320 punti analizzati e il relativo valore della velocità residua in x e in y.

- Creazione di due file .tin a partire dai due .xyz utilizzando lo strumento *crea .tin da .xyz*.
- “Quotatura” di due files .geo (contenenti il dominio della laguna) a partire dai dati contenuti nel .tin delle maglie del dominio.

In questo caso non è stato necessario utilizzare il comando *tappabuchi* per quotare anche le maglie non quotate posizionate ai margini della mesh considerata.

Infine, importando il file .bup in *Incidenze*, è stato possibile rappresentare graficamente i files di output ottenuti scegliendo le impostazioni che rendono migliore la lettura e comprensione dei risultati.

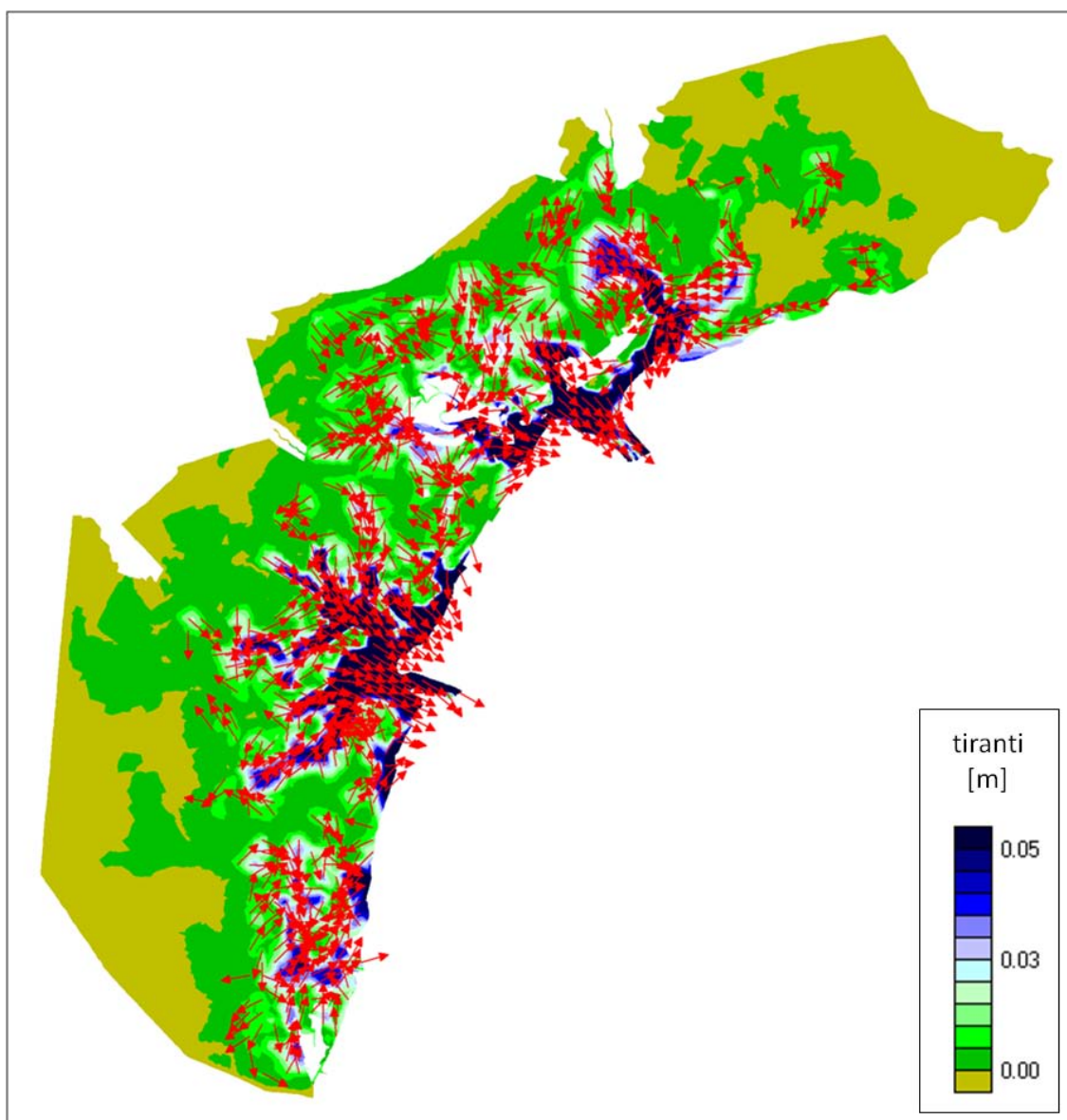


Figura 8.24: Velocità residue delle macchie, immissione al flesso calante (file .out n°3)

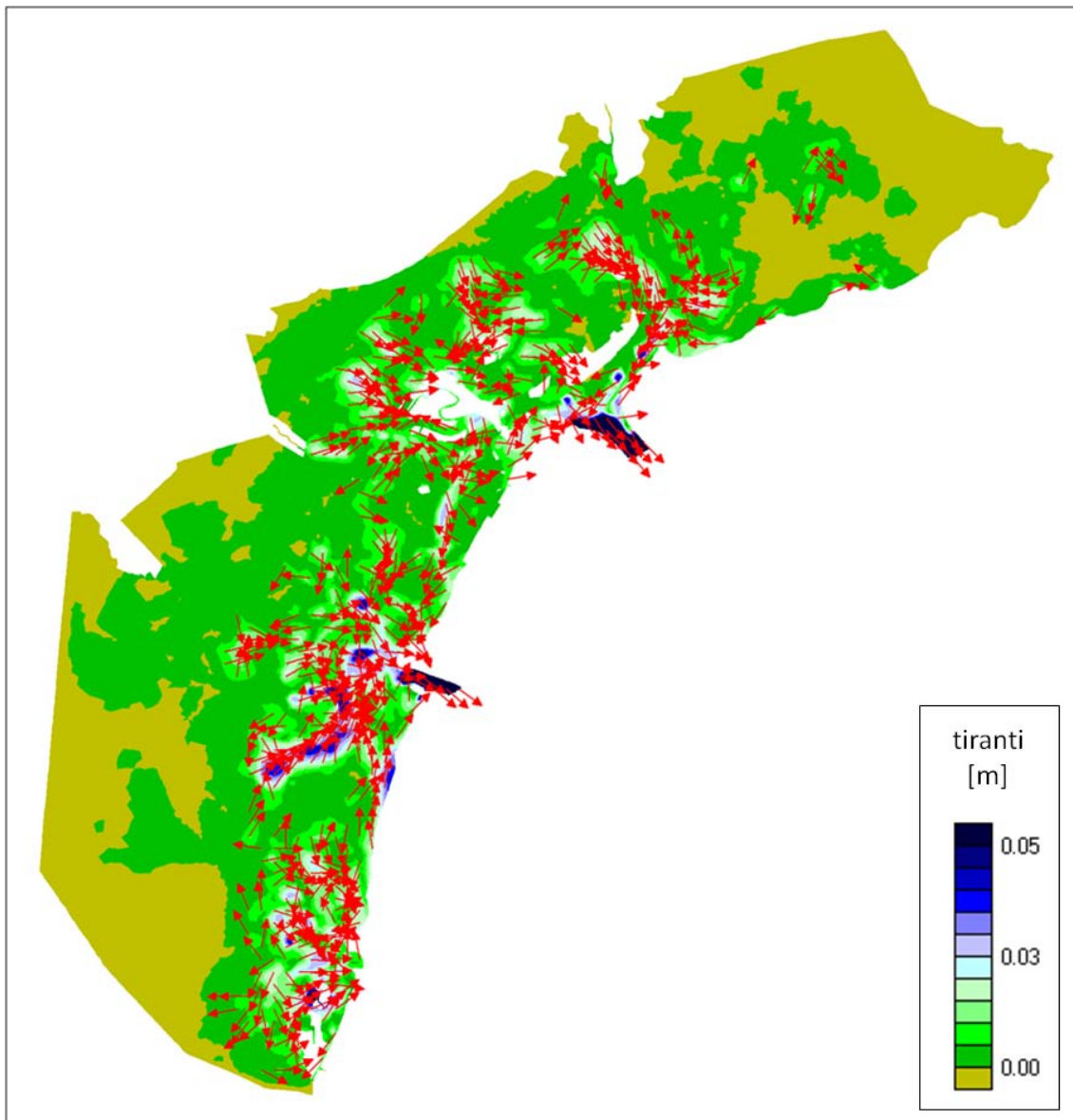


Figura 8.25: Velocità residue delle macchie, immissione al cavo (file .out n°4)

Le figure riportate, purtroppo, non evidenziano risultati particolarmente interessanti in quanto l'andamento generale delle velocità residue è molto variabile e non privilegia nessuna direzione, nella maggior parte dei casi.

Si deve dire, però, che nelle figure 8.23 e 8.24, in corrispondenza delle bocche di Lido e di Malamocco, laddove i tiranti sono maggiori, la direzione delle frecce è concorde e diretta verso il mare aperto. Anche in queste due situazioni, comunque, osservando le zone più periferiche della laguna, caratterizzate da livelli inferiori, si ritrovano andamenti piuttosto casuali.

Capitolo 9

SITUAZIONE ATTUALE E FUTURA DELLA LAGUNA DI VENEZIA

9.1 IL COMPORTAMENTO DELLA LAGUNA NEGLI ANNI 2000

Per concludere si presenta in questo capitolo un breve confronto tra i risultati ottenuti utilizzando il file .geo relativo alla geometria e alle caratteristiche della laguna di Venezia nel 1901 e quelli ricavati dallo studio¹ compiuto utilizzando i rilievi batimetrici del 2003.

Tutte le figure riportate di seguito fanno riferimento al .geo e ai risultati ricavati analizzando la situazione lagunare nei primi anni 2000.

Per comprendere meglio le differenze tra i risultati che si sono ottenuti nelle due diverse situazioni è necessario soffermarsi innanzitutto sui due files .geo utilizzati, che sono il punto di partenza per entrambi gli studi.

Confrontando la figura 6.2 con la 9.1 si possono evidenziare i cambiamenti avvenuti per le quote del fondo della laguna tra il 1901 e il 2003. Se si osserva la figura 9.1 si notano subito i valori inferiori delle altezze del fondo h_f rispetto a quelle visualizzabili dal file .geo del 1901, infatti in questo caso la profondità media nella laguna centrale è circa 1,45 metri ben diversa dai valori di poco inferiori ai 50 cm propri dei primi anni del '900. Perciò si può confermare ciò che già nel capitolo 3 era stato sottolineato: nell'arco di appena un secolo si riscontrano nella laguna centrale incrementi di profondità media di quasi 1 metro, causati dai processi erosivi dovuti ai numerosi interventi dell'uomo.

Nella figura 9.1 spiccano i tre canali principali che partono dalle tre bocche e si protraggono verso le zone interne del bacino; purtroppo, però, la fitta rete dei corsi d'acqua che nella figura 6.2 era ben incisa tra i bassifondi e topologicamente ben articolata è sparita del tutto. Ne deriva la perdita, per il bacino, della sua efficienza idraulica che controllava il fenomeno della propagazione di marea, questo si vedrà anche nel seguito analizzando le rappresentazioni cromatiche del coefficiente di dispersione. Inoltre la profondità dei tre canali si è incrementata notevolmente (è sufficiente confrontare le immagini) dopo la costruzione dei moli e lo scavo del canale navigabile dei petroli

¹È stata consultata la tesi di laurea "Spatial distribution of tidally-averaged diffusion coefficient in the Venice lagoon", Università di Padova, A.A. 2011-2012, relatore: Prof. Ing. Andrea Defina, laureanda: Claudia Zoccarato.

comportando importanti modificazioni del regime sia degli scambi di portata mare-laguna sia delle correnti nel retrostante sistema lagunare (come spiegato al capitolo 3).

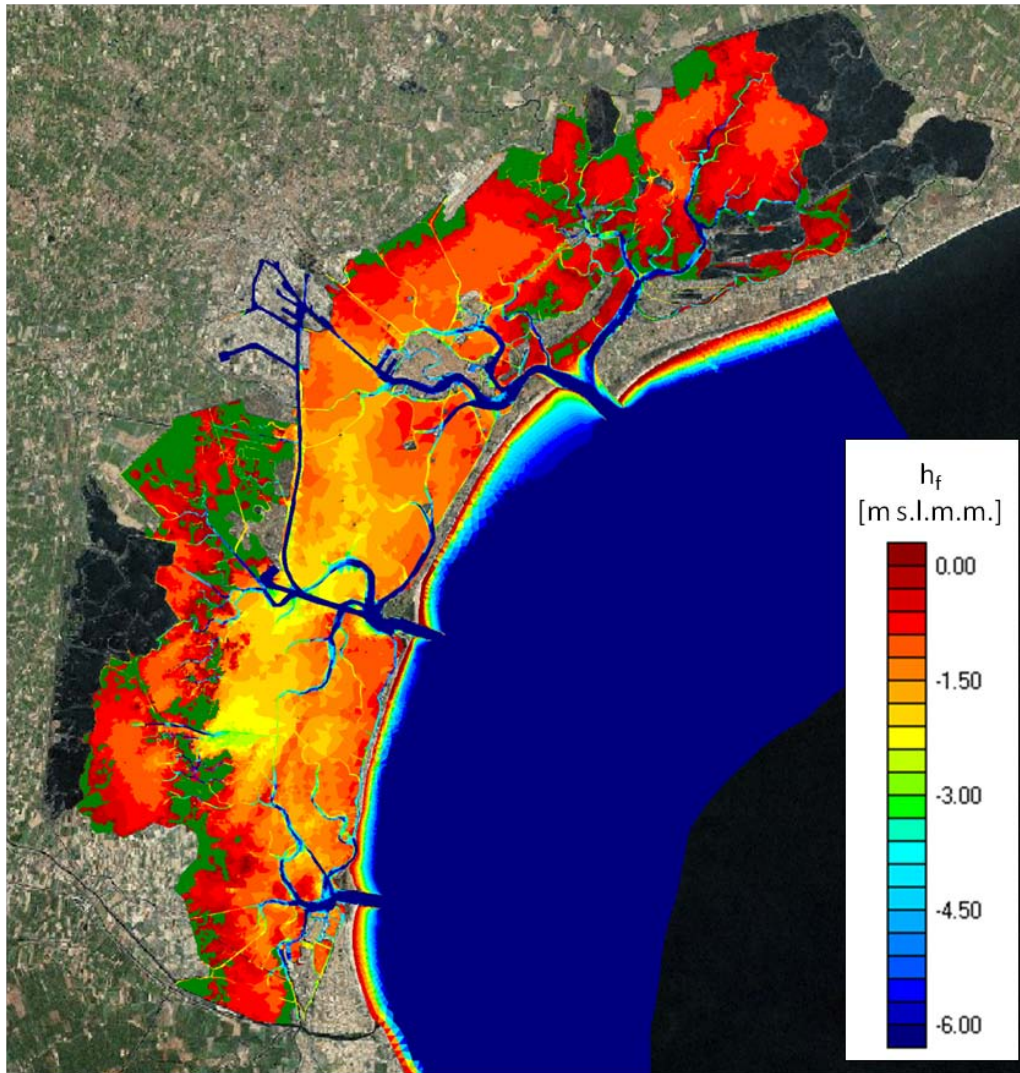


Figura 9.1: Quote del fondo della laguna di Venezia (m s.l.m.m.)

La diversa estensione delle barene (superfici con quote del fondo superiori a 0.25 metri sul livello del mare, individuabili nelle figure perchè caratterizzate dal colore verde) evidenzia l'intensità dei fenomeni erosivi che stanno colpendo l'intero bacino lagunare in senso verticale. Nel 1901 le barene coprivano all'incirca 160 km^2 all'interno del perimetro della conterminazione del 1924, considerando anche le barene delle valli da pesca. Esse si distribuivano su aree morfologicamente molto articolate (nella laguna superiore e sul lato ovest della laguna centrale-inferiore), comprendendo al loro interno specchi d'acqua più o meno estesi, ma generalmente di modesta entità. Con il passare degli anni la loro superficie si è ridotta in modo considerevole (visibile anche in figura 9.1) coprendo nel 2003

soltanto 48 km^2 , valli da pesca comprese. Si ricorda, infatti (capitolo 3) che il tasso di perdita era relativamente moderato fino ai primi anni del '900 e soltanto nel corso di questo secolo si è registrato un cambiamento significativo con valori corrispondenti ad un tasso di erosione annua quasi quadruplicato rispetto a quello dei tre secoli precedenti.

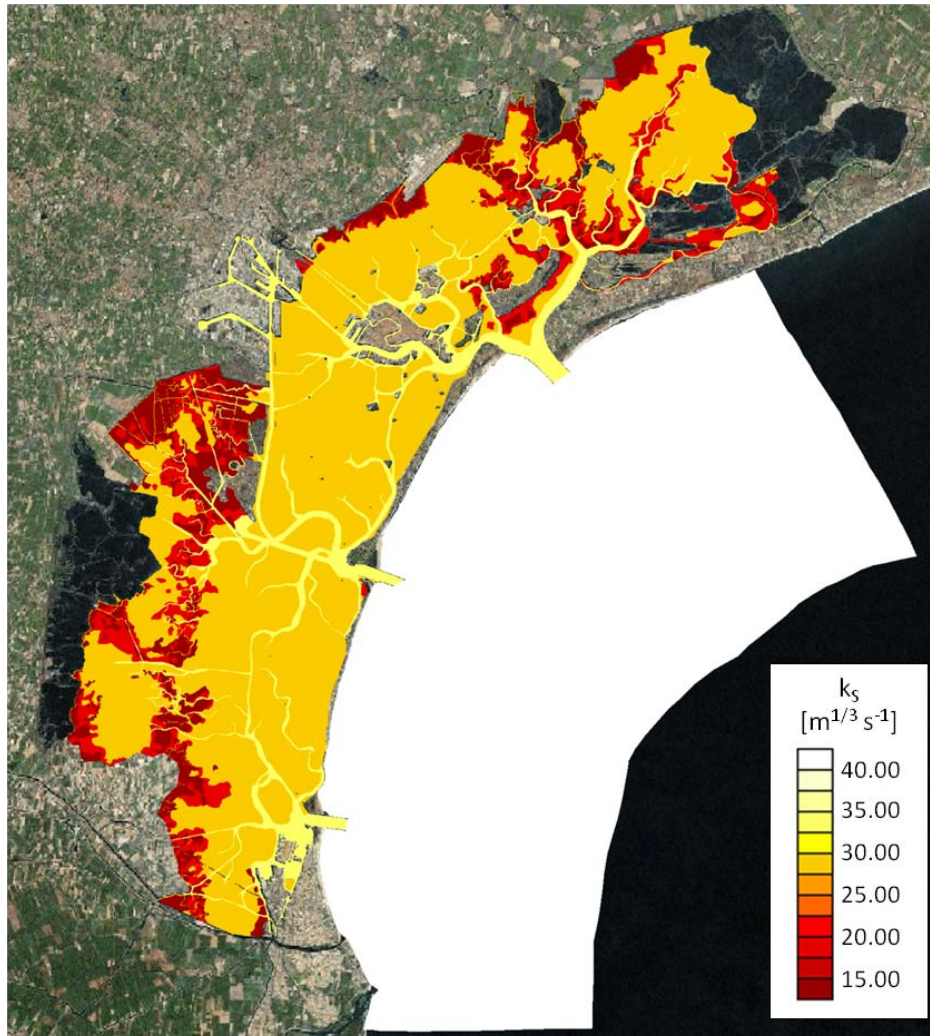


Figura 9.2: Distribuzione del coefficiente di Gauckler-Strickler nella laguna di Venezia ($m^{1/3}s^{-1}$)

Osservando le figure 6.3 e 9.2 ci si accorge immediatamente che, mentre in mare aperto e lungo i canali principali i valori del coefficiente di Strickler assegnati alle maglie del dominio sono gli stessi, rispettivamente 40 e $35 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$, nel resto del bacino la situazione è differente. Nel file .geo relativo alla laguna del 1901 quasi tutte le superfici sono caratterizzate da $k_s = 15 \div 20 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$, invece nel file corrispondente alla situazione dei primi anni 2000 il valore del coefficiente di scabrezza prevalente nell'intero bacino è pari a $30 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$. Questo indica che la laguna del 2003 possiede velocità delle correnti più elevate, rispetto a quelle presenti in passato, e di conseguenza minor resistenza del fondo.

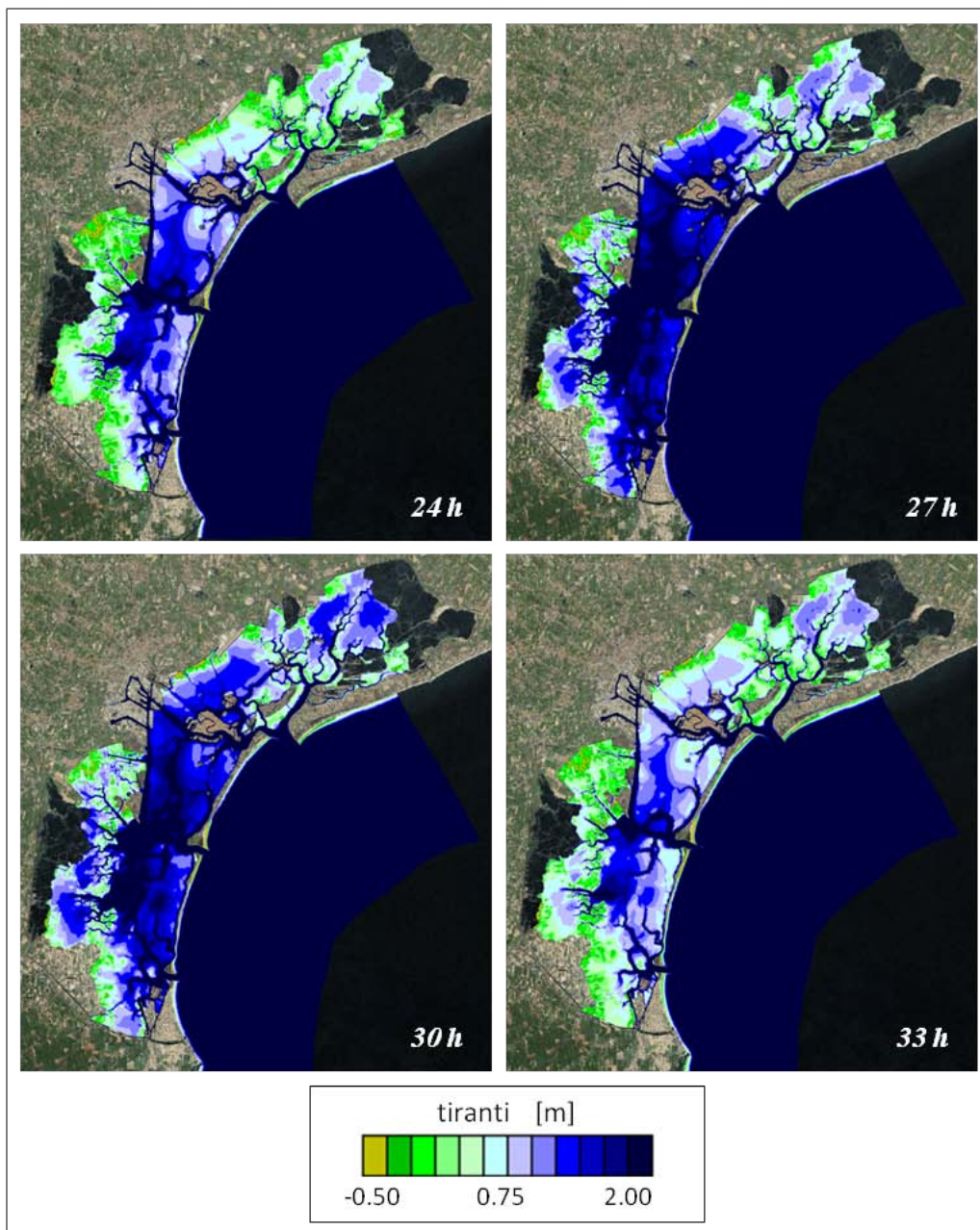


Figura 9.3: Variazioni dei tiranti d'acqua nel tempo nella laguna di Venezia

Nella figura 9.3 si osserva l'andamento dei tiranti nel tempo relativi allo studio del 2003; i risultati evidenziati fanno riferimento al terzo periodo (dalla 24^a ora alla 33^a) di marea e fotografano la situazione ad intervalli di tempo di tre ore, in corrispondenza di due punti di flesso (a livello nullo) della sinusoide, del colmo e del cavo propri del periodo analizzato.

I valori dei tiranti variano nel bacino seguendo l'oscillazione della marea e, come già riscontrato nella figura 6.9, anche in questa situazione è visibile un certo ritardo dell'onda di propagazione

nelle aree più interne del bacino. Da questi quattro scatti si nota come i tiranti assumano valori anche abbastanza rilevanti in tutta la laguna centrale e inferiore (soprattutto alla 27^a e 30^a ora) a differenza del risultato ottenuto sfruttando il .geo del 1901, nel quale i tiranti delle zone d'acqua adiacenti ai canali possiedono valori modesti facendo risaltare la fitta ragnatela di canali più e meno grandi. Questo fatto può essere spiegato dall'approfondimento e appiattimento dei fondali avvenuti in principal modo negli ultimi anni. Per livellamento del fondo si intende: l'imbonimento dei canali, l'abbassamento dei fondali circostanti e la totale scomparsa delle ultime ramificazioni dei canali e tutto questo è visibile nelle immagini riportate e descritte in questo capitolo.

Si può quindi dire che guardando la figura 6.9 si riconosce la particolare morfologia lagunare caratterizzata da diverse quote del fondo (relative a canali, barene, velme) che purtroppo adesso sta scomparendo.

Le mappe tematiche seguenti propongono la rappresentazione del $\log_{10}(D)$ in scala cromatica per le diverse condizioni di immissione delle 1100 macchie nel dominio di calcolo relativo allo studio del 2003.

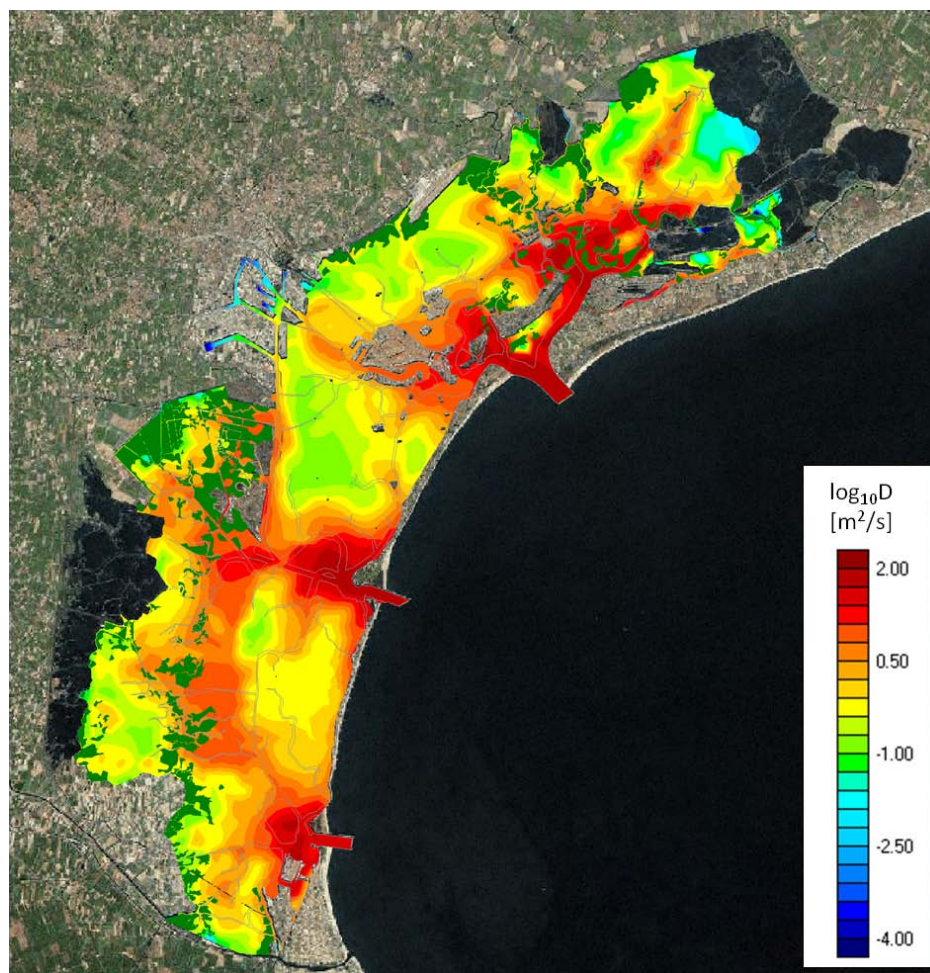


Figura 9.4: Rappresentazione cromatica del $\log_{10}(D)$, immissione al flesso crescente (file .out n°1)

Anche da questi risultati si osserva che i valori più alti del coefficiente di dispersione si trovano in prossimità delle tre bocche, infatti in tali aree i canali principali possiedono velocità piuttosto elevate e di conseguenza incrementano la diffusione delle particelle, mentre addentrandosi nel bacino una progressiva riduzione del coefficiente è visibile, in particolare, lungo i margini interni della laguna superiore e centrale. Invece, come constatato anche nel capitolo precedente, le superfici prossime alle città di Venezia e Chioggia possiedono valori di dispersione abbastanza alti.

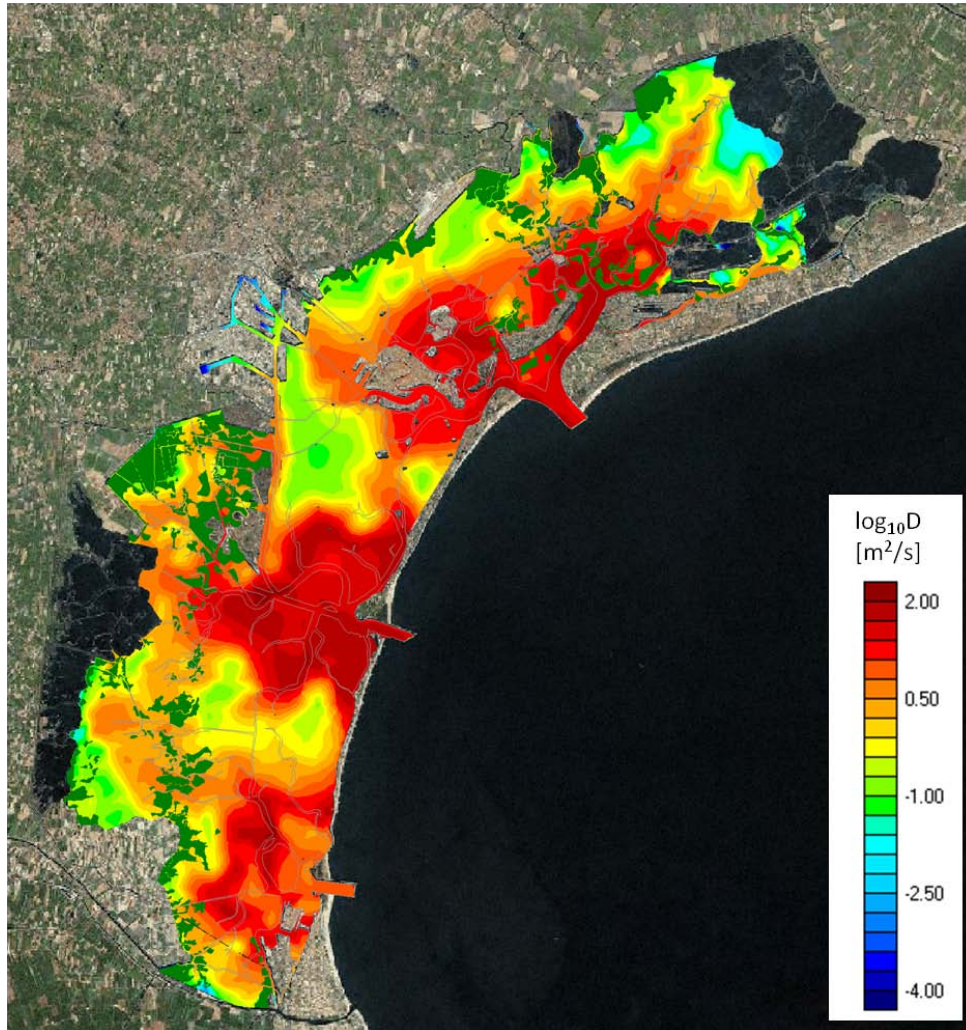


Figura 9.5: Rappresentazione cromatica del $\log_{10}(D)$, immissione al colmo (file .out n°2)

Al variare dell'istante di immissione del tracciante si assiste a una variazione abbastanza uniforme dei valori del $\log_{10}(D)$ su tutto il dominio: alti coefficienti di dispersione caratterizzano le zone prossime alle tre bocche disegnando un'area di influenza "a bulbo", valori inferiori, invece, si ricavano nelle zone più periferiche del bacino, lontane dalle bocche. Pertanto la diffusione dei soluti è più elevata laddove sono maggiori le correnti e la vicinanza ai canali principali: ne consegue una miglior qualità dell'acqua rispetto a quella presente nelle aree marginali della laguna.

Confrontando le figure 9.4, 9.5, 9.6 e 9.7 si può vedere (come succede anche per i risultati ottenuti dallo studio effettuato sulla laguna del 1901, capitolo 8) che i valori massimi di dispersione si realizzano con immissione in condizione di massimo livello (figura 9.5), quando le macchie, ancora nella loro posizione iniziale, vengono investite dall'azione di riflusso delle correnti verso il mare. In questo caso la possibilità per le particelle di giungere in prossimità delle bocche d'ingresso comporta ottime probabilità di andare incontro a una buona dispersione.

I minori valori del coefficiente di dispersione intermareale riguardano, al contrario, l'immissione al cavo (figura 9.7) che limita o compromette il successivo avvicinamento delle macchie alle bocche durante la fase di marea calante. Risultati abbastanza simili in termini di D e intermedi tra le due situazioni estreme appena citate vengono prodotti dall'immissione ai flessi.

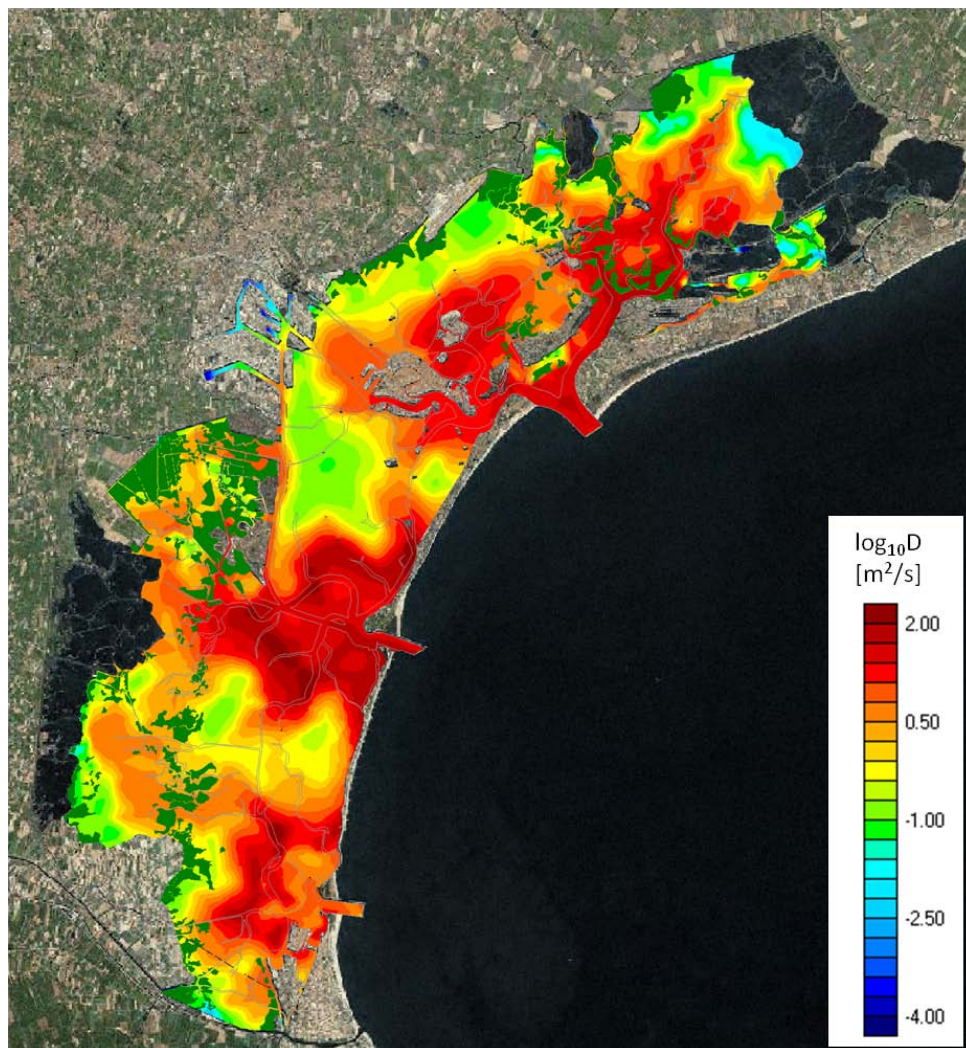


Figura 9.6: Rappresentazione cromatica del $\log_{10}(D)$, immissione al flesso calante (file .out n°3)

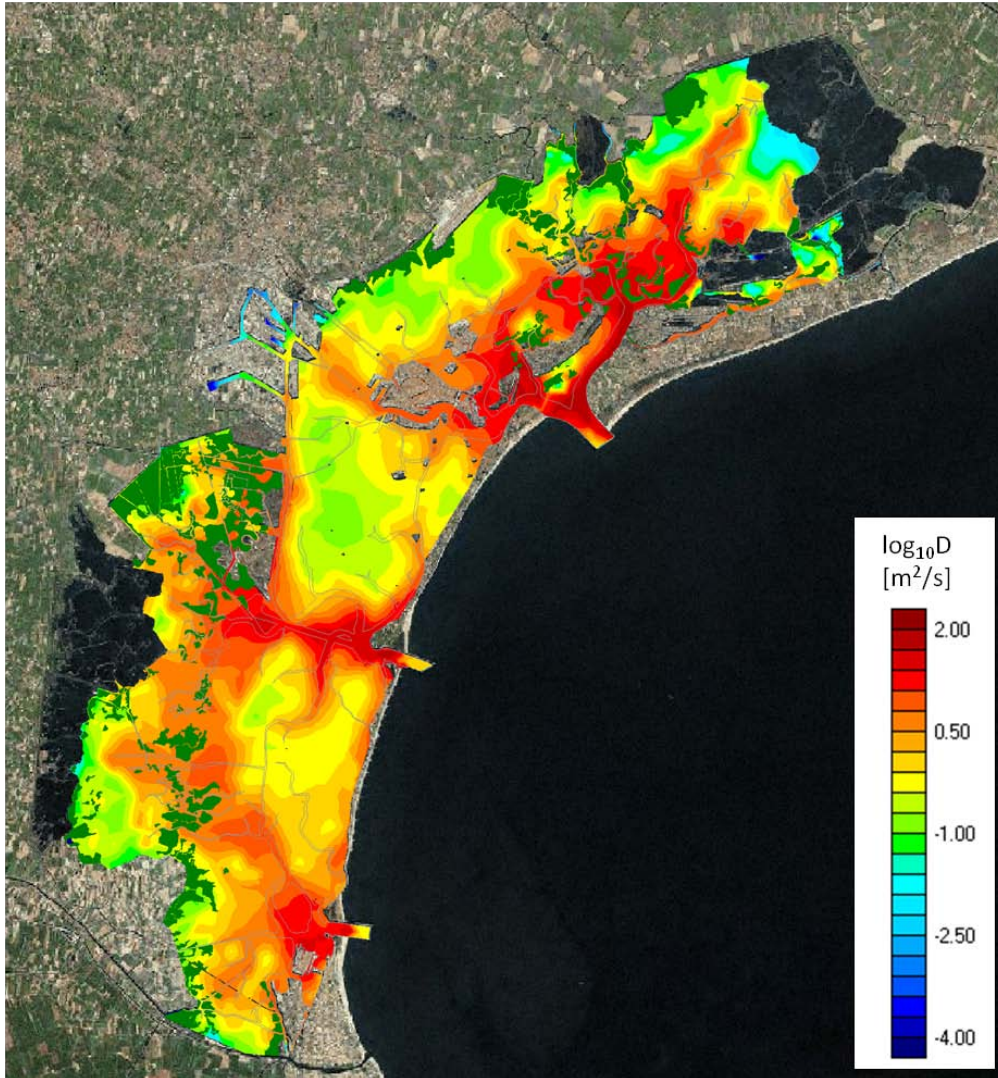


Figura 9.7: Rappresentazione cromatica del $\log_{10}(D)$, immissione al cavo (file .out n°4)

La rappresentazione D_{medio} , sempre in termini di logaritmo, è proposta in figura 9.8, essa riassume la capacità dispersiva nell'intero periodo e si ricava compiendo la media aritmetica dei valori del $\log_{10}(D)$ ottenuti dalle quattro diverse simulazioni.

La distribuzione del coefficiente medio di dispersione intermareale ha lo stesso andamento generale raffigurato nelle precedenti quattro immagini. Si distinguono chiaramente le tre aree con intensa capacità dispersiva nei pressi delle tre bocche. L'elevato grado del ricambio idrico presente nelle zone dove scorrono i canali principali, caratterizzati da velocità piuttosto elevate, diminuisce gradualmente spostandosi verso i margini del bacino lagunare.

Si osserva inoltre (come in figura 8.21) la maggiore attività, sia per l'intensità del fenomeno che per l'estensione dell'area, delle bocche di Malamocco e di Lido rispetto a quella di Chioggia.

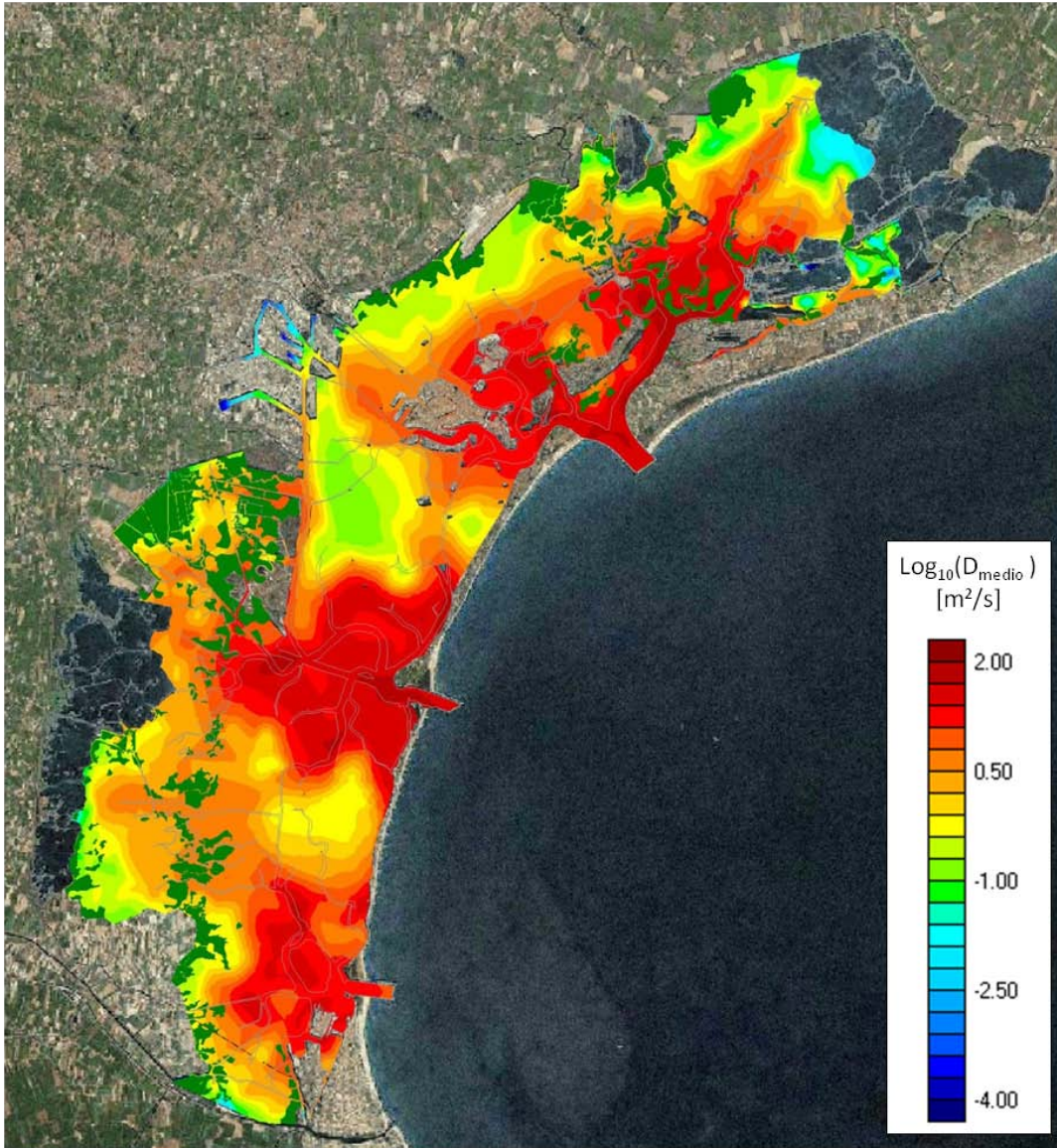


Figura 9.8: Rappresentazione cromatica del $\log_{10}(D_{medio})$

Il confronto tra la rappresentazione cromatica del $\log_{10}(D_{medio})$ relativa alla laguna del 1901 e del 2003 è illustrato nella sezione 9.3.

9.2 PREVISIONI FUTURE PER LA LAGUNA

Recentemente è stato sviluppato, internamente al dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA) dell'Università di Padova, un modello concettuale per descrivere a lungo termine l'evoluzione di un bacino in erosione come la laguna di Venezia. In particolare, la tendenza evolutiva

verificatasi in essa nel corso dell'ultimo secolo, ha permesso di stimare, utilizzando un'interpolazione lineare, la batimetria da assegnare all'ipotetica laguna nel 2050.

Il modello che ha permesso il confronto fra le diverse condizioni nei vari anni si basa sull'analisi dello sforzo di taglio delle onde da vento, ritenuto il principale fattore responsabile della risospensione dei sedimenti. Si è assunto, in prima approssimazione, che l'altezza d'onda con fetch illimitato per una fissata velocità del vento, possa essere valutata imponendo l'equilibrio locale tra l'energia dell'onda generata dal vento che agisce sulla superficie libera e la dissipazione d'energia dovuta all'attrito col fondo al frangimento. In questo modo la condizione di bilancio energetico permette di calcolare la velocità orbitale al fondo, secondo la teoria lineare, e di conseguenza lo sforzo di taglio causato dalle onde.

Attraverso l'analisi di tutti i dati disponibili è stato possibile costruire la funzione di densità della profondità del fondo in tutto il bacino di Venezia (comprese le aree caratterizzate da fetch limitato), valutando tutte le reali cause dell'erosione: non soltanto le onde da vento ma anche il moto ondoso provocato dai natanti.

Il dominio di partenza, sul quale si è compiuto lo studio, corrisponde all'estensione della laguna del 2003, che include tutte le precedenti configurazioni. È stato però necessario mediare i dati su vaste superfici (la laguna centro-meridionale e quella settentrionale) per livellare le incertezze locali e far risaltare la globale tendenza evolutiva, dal momento che la differenza spaziale e temporale delle mappe e la loro non estrema precisione causano errori batimetrici e disomogeneità nelle indagini.

Per analizzare e comprendere in maniera più dettagliata il trend evolutivo dell'intera laguna si può osservare la figura 9.9 che evidenzia le due principali fasi di evoluzione di un bacino in erosione, già anticipate nel capitolo 3.

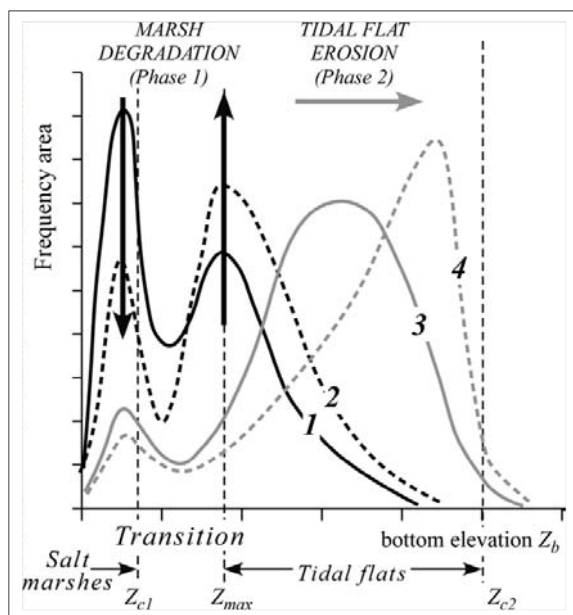


Figura 9.9: Evoluzione di un bacino in erosione (Carniello, Defina, D'alpaos, 2009)

Si identifica una prima fase, rappresentata dalle linee nere, nella quale le barene si deteriorano e diminuiscono progressivamente la loro estensione alimentando con i loro sedimenti i bassifondi adiacenti che, in questo modo, sono in grado di mantenere la loro quota originale. Nella fase successiva, invece, caratterizzata dalle linee grigie, l'elevazione media dei bassifondi diminuisce perchè le barene, che si sono in gran parte ridotte, non possono più fornire loro la quantità di sedimenti sufficiente a bilanciare l'erosione che li affligge.

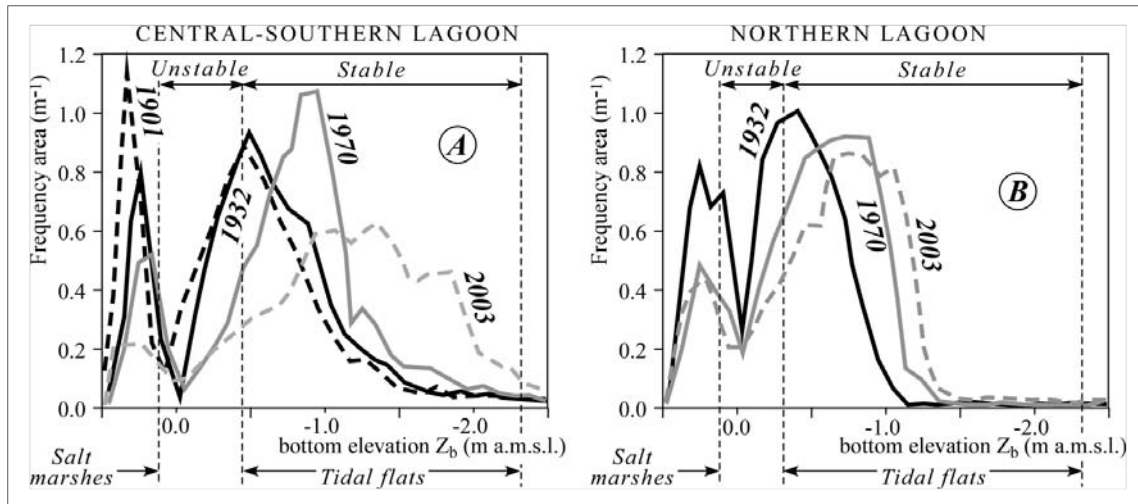


Figura 9.10: Evoluzione del fondo a confronto (Carniello, Defina, D'alpaos, 2009)

Con riferimento al grafico (a sinistra) in figura 9.10, si osserva che la linea (tratteggiata nera) relativa alla situazione del 1901 mostra un picco nella frequenza della profondità dei bassifondi approssimativamente a $Z_b = -0.5\text{ m}$. Nel corso del 19° secolo vaste aree della laguna sud erano state invase dalle barene e, in conformità con lo schema di evoluzione a lungo termine, si deduce che la seconda fase di erosione dei bassifondi non era ancora iniziata e l'elevazione del fondo $Z_b = -0.5\text{ m}$ corrisponde all'incirca alla profondità critica dei bassifondi Z_{max} .

Con l'inizio del 20° secolo, in seguito alla costruzione dei moli sulle bocche, il flusso dei sedimenti uscente dalla laguna è aumentato esponenzialmente incrementando, così, la tendenza erosiva. In particolare nel periodo tra il 1901 e il 1932, a causa del deterioramento delle barene, il primo picco, che rappresenta appunto le loro aree, si è ridotto in ampiezza mentre il picco dei bassifondi è aumentato. Nonostante la loro variazione di ampiezza, i due picchi mantengono la precedente altezza di fondo suggerendo così che i sedimenti provenienti dal processo di deterioramento delle barene hanno alimentato i bassifondi adiacenti contrastando la loro erosione. Invece negli anni compresi tra il 1932 e il 1970, la regressione delle barene raggiunge un momento tale che la quantità di sedimenti forniti dal deterioramento non è sufficiente a contrastare l'erosione dei bassifondi che infatti risultano approfonditi. La stessa tendenza, costituita da riduzione delle barene ed erosione dei bassifondi, è presente nella variazione della planimetria nel periodo 1970-2003.

Quindi confrontando le due zone studiate (central-southern lagoon e northern lagoon) si nota che il range di profondità del fondo instabile relativo al bacino settentrionale è più piccolo e l'altezza

media dei bassifondi nel 1932 è leggermente superiore alla corrispondente quota della laguna centro meridionale. Inoltre l'elevazione del fondo relativa al picco dei bassifondi nel 1970 e nel 2003 evidenzia che il loro tasso di approfondimento nella laguna nord è più lento rispetto a quello della laguna centrale e meridionale.

In generale, sembra che sia il nord che il centro-sud stiano ancora vivendo la seconda fase di erosione dei bassifondi, ma con velocità differenti, e che, come conseguenza della continua perdita di sedimenti, i bassifondi si stiano spostando verso una configurazione di equilibrio stabile più profonda.

Le cause del diverso comportamento della laguna superiore rispetto alle altre aree del bacino sono molteplici, tra queste ricordiamo che: la capacità erosiva dell'onda diminuisce nella laguna nord in quanto nelle condizioni di fetch limitato l'ampiezza della curva di stabilità teorica si riduce; l'apporto di sedimenti al bacino, anche se limitato, nutre prevalentemente la parte settentrionale della laguna e il percorso che i sedimenti in sospensione devono compiere per raggiungere la bocca di Lido è, in media, molto più lungo di quello per raggiungere le bocche di Chioggia e Malamocco nel centro-sud della laguna.

Sulla base dei più recenti dati batimetrici, è stato valutato il tasso di dislivello locale del fondo all'interno della laguna. L'analisi si è effettuata considerando l'elevazione del livello medio del mare, Z_b , contemporaneamente al contributo di erosione e del relativo aumento del livello del mare. La figura 9.11 (immagine A) illustra il tasso di dislivello del fondo, che si estende da 3 cm/anno (erosione) a 1 cm/anno (deposizione).

Si nota, in media, un basso tasso di erosione per la laguna superiore e per la parte meridionale del bacino, al confine con la terra ferma, protetta dalle barene dagli effetti del moto ondoso. In questi luoghi si osserva anche un deposito moderato, mentre una forte erosione è visibile nella zona centrale e meridionale della laguna e anche nei pressi della città di Venezia.

Da queste considerazioni e ipotizzando che la tendenza evolutiva della profondità del fondo continui invariata nei prossimi decenni, si è potuto formulare un pronostico per la configurazione futura della laguna di Venezia del 2050, partendo dalla batimetria del 2003. È stato considerato un orizzonte temporale di alcuni decenni per assicurare che l'estrapolazione lineare fosse ragionevolmente accettabile.

Nella figura 9.11 sono riportate anche le batimetrie della laguna del 2003 e 2050 (rispettivamente immagine B e C); confrontandole si nota subito l'aumento delle profondità del fondo nella laguna centrale e meridionale previsto per il futuro.

Purtroppo questi risultati confermano ciò che già nel capitolo 3 è stato annunciato: la laguna veneziana fra qualche decina d'anni sarà un ambiente meno articolato caratterizzato da una configurazione uniformata con profondità di $2 \div 2.5 m$ circa.

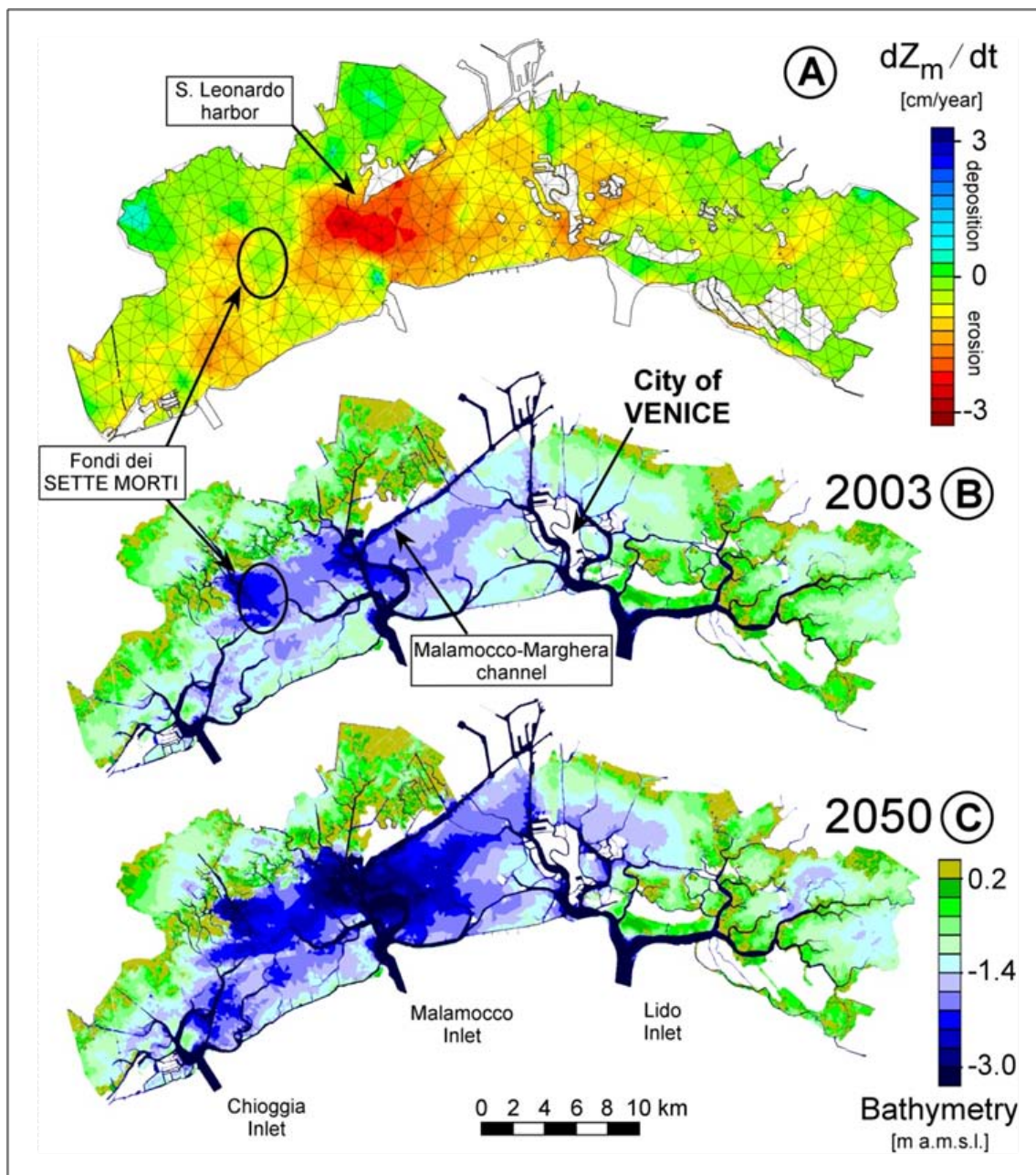


Figura 9.11: Evoluzione delle batimetrie nel tempo (Carniello, Defina, D'alpaos, 2009)

È stato calcolato, in un lavoro di tesi², il coefficiente di dispersione intermareale per questa configurazione ipotetica della laguna. Nella figura 9.12 si riporta la rappresentazione cromatica del $\log_{10}(D_{medio})$ che viene commentata e confrontata con quelle proprie della situazione lagunare del 1901 e del 2003 nella sezione 9.3.

²Tesi di laurea "Distribuzione spaziale del coefficiente di dispersione intermareale nella laguna di Venezia passata, presente e futura", Università di Padova, A.A. 2012-2013, relatori: Andrea Defina e Luca Carniello, laureanda: Federica Vinci.

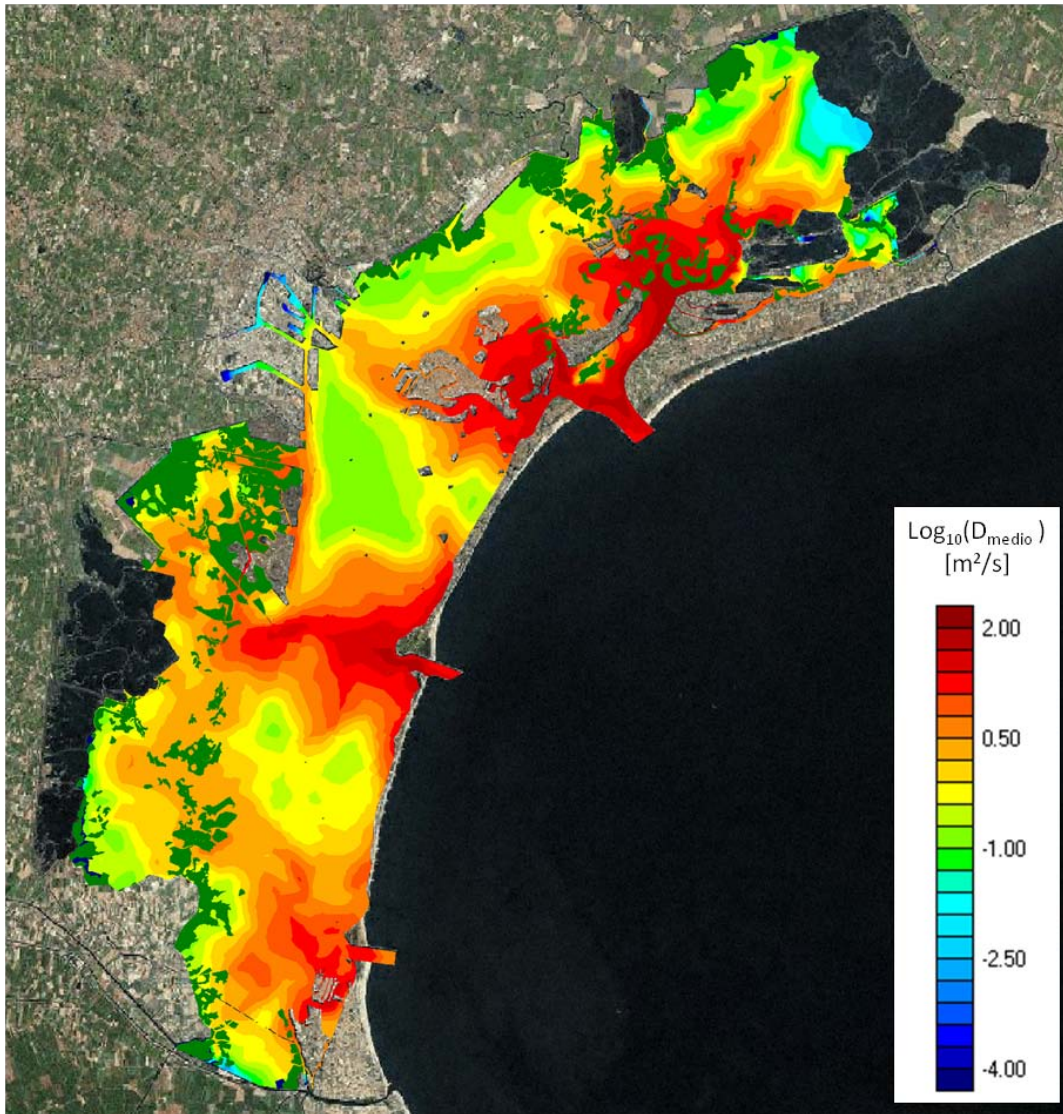


Figura 9.12: Rappresentazione cromatica del $\log_{10}(D_{medio})$

9.3 EVOLUZIONE DELLA LAGUNA DI VENEZIA CON RIFERIMENTO AI PROCESSI DISPERSIVI

Si inseriscono, a questo punto, le figure 9.13 e 9.14 che illustrano, rispettivamente un confronto tra le batimetrie della laguna di Venezia del 1901, del 2003 e del 2050 e le relative distribuzioni del $\log_{10}(D_{medio})$.

Si vuole evidenziare l'evoluzione della batimetria nel tempo perchè in qualche modo essa "controlla" l'entità della dispersione. Dalla figura 9.13 si osservano chiaramente le variazioni delle quote del fondo del bacino avvenute negli anni passati e previste per quelli futuri: dal 1901 la fitta rete

di canali, distribuita sull'intera superficie lagunare, è scomparsa mentre un continuo e progressivo processo d'approfondimento dei fondali ha iniziato a manifestarsi, in particolar modo nella laguna centrale.

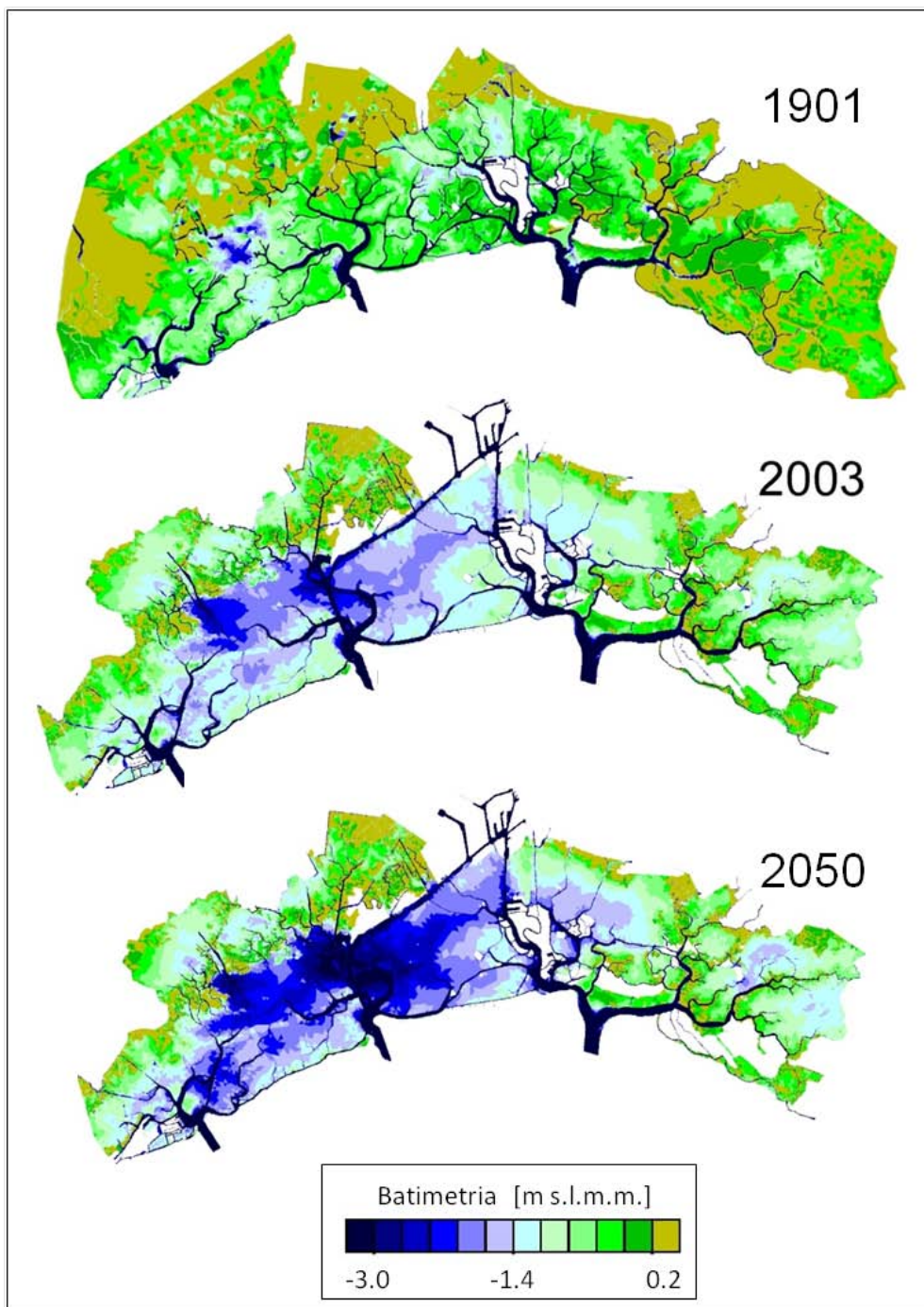


Figura 9.13: Confronto tra le batimetrie

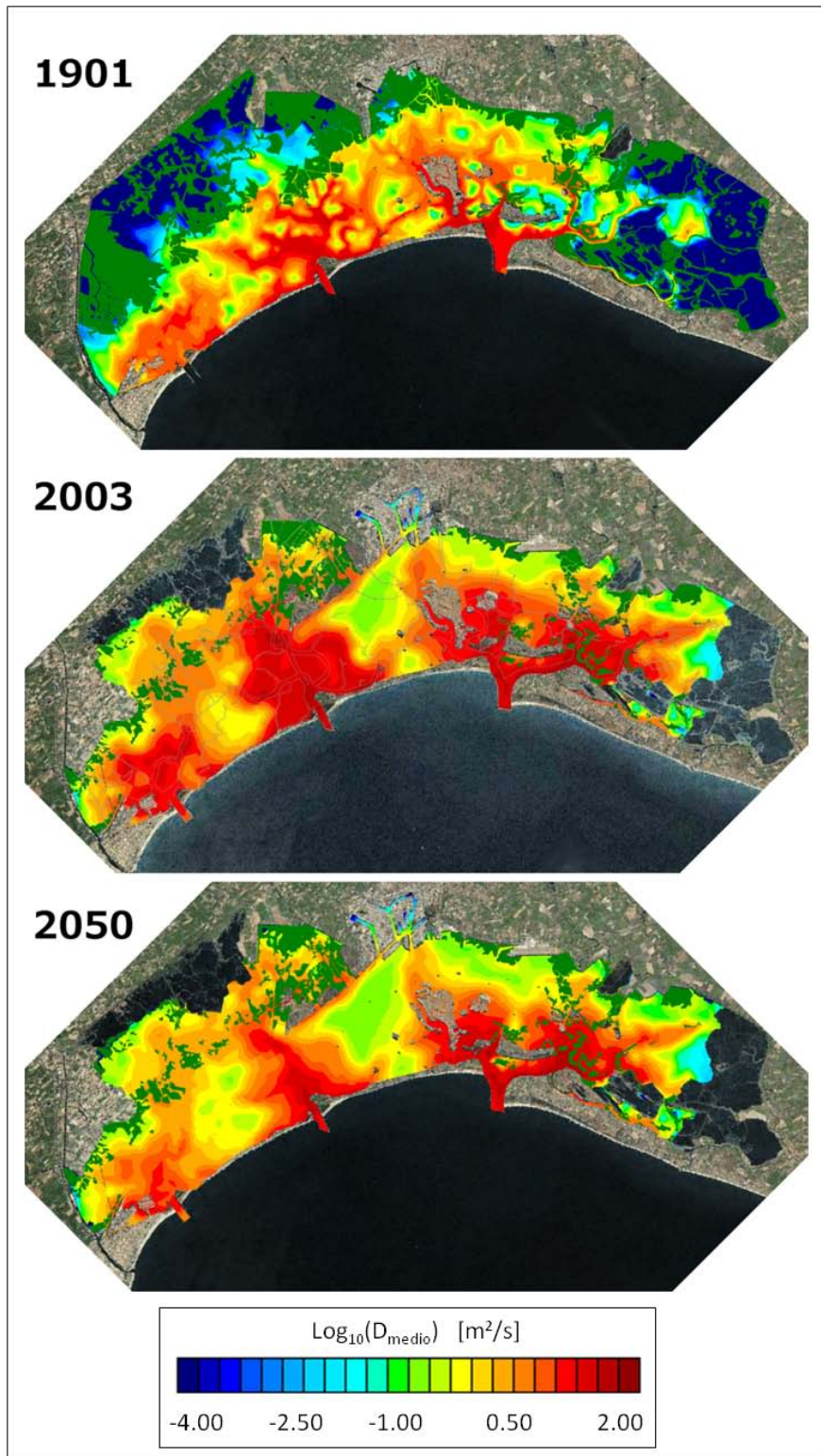


Figura 9.14: Confronto tra le distribuzioni del $\log_{10}(D_{\text{medio}})$.

Osservando la figura 9.14, che riporta come già detto la rappresentazione cromatica del $\log_{10}(D_{medio})$ relativa allo studio del comportamento della laguna di Venezia negli anni 1901, 2003 e 2050, si possono notare delle differenze non irrilevanti e di particolare interesse, nonostante i confini dei tre domini di calcolo non siano i medesimi, infatti i files .geo del 2003 e del 2050 non prendono in considerazione alcune aree della laguna superiore e del lato ovest del bacino centro-inferiore.

La situazione del 1901 dimostra un miglior ricambio delle acque nelle zone idraulicamente più lontane dalle bocche dovuto alla presenza di un tessuto morfologico estremamente articolato, che accresce il ruolo dei fenomeni dispersivi. Tale tessuto è creato dalle barene le quali, solcate da una miriade di piccoli canali, si interpongono a specchi d'acqua poco profondi. La conseguenza della perdita delle forme originali della laguna è proprio la riduzione dei benefici effetti del periodico alternarsi delle maree e quindi del ricambio delle acque nelle zone marginali.

Nella rappresentazione cromatica del $\log_{10}(D_{medio})$ relativa alla situazione lagunare dei primi anni del 2000 si osserva, invece, l'assenza del contributo, a favore della dispersione, dell'ampia e fitta rete di piccoli e grandi canali che attraverso le sue braccia copriva la superficie lagunare. Si nota, però, l'aumento dei valori dei coefficienti di dispersione in prossimità della bocca di Chioggia, rispetto alla situazione dei primi del '900, conseguenza della costruzione dei suoi moli e quindi dell'incremento della sua profondità e delle velocità delle correnti che l'attraversano. Allo stesso tempo si nota anche la maggior dispersione presente nelle bocche di Lido e Malamocco in seguito ai loro continui approfondimenti.

Analizzando, a questo punto, la figura relativa alla dispersione media riscontrata per la laguna del 2050 si osserva immediatamente che nel futuro saranno presenti valori più bassi del coefficiente di dispersione nelle aree che si estendono tra la bocca di Lido e di Malamocco e tra quest'ultima e quella di Chioggia, cioè si amplieranno le zone colorate di verde dove i valori erano già bassi. Inoltre si nota che le superfici prossime alle tre bocche non possiederanno più una diffusione così elevata, in particolar modo la diminuzione dell'effetto dispersivo sarà più accentuata nella parte centro meridionale del bacino, ovvero nei pressi delle bocche di Chioggia e di Malamocco. Infine, sembra che la laguna nord sentirà meno questa tendenza alla riduzione dei coefficienti, anche se si nota comunque un rallentamento nella dispersione proprio attorno alla città di Venezia.

La situazione futura evidenzia quindi un'ulteriore diminuzione del ricircolo delle correnti e di conseguenza un progressivo peggioramento della qualità delle acque dal momento che un'ipotetica macchia di inquinante resterebbe più a lungo, all'interno del bacino, non riuscendo a purificarsi ed ossigenarsi con l'acqua del mare.

Perciò si può dire che il comportamento della laguna è molto cambiato nell'ultimo secolo e le previsioni per il futuro non sono positive. Da questo studio si comprende che il ricambio delle acque nella laguna di Venezia era migliore nei primi anni del '900 comportando, quindi, minori problematiche legate alla scarsa ossigenazione delle acque e allo sviluppo di ambienti malsani che compromettono l'equilibrio degli ecosistemi esistenti e le attività antropiche di pesca e allevamento.

Capitolo 10

CONCLUSIONI

In questo studio il coefficiente di dispersione intermareale è stato proposto come strumento di misura della qualità delle acque nella laguna di Venezia. La capacità di rinnovo idrico, cui si è cercato di dare una lettura in chiave analitica, rappresenta solo uno dei possibili indicatori dello stato di salute del bacino, infatti la quantità di inquinanti riversati in esso e l'intensità dello sfruttamento dell'ambiente, legato alle attività primarie praticate al suo interno o nelle immediate vicinanze, rappresentano altri fattori fondamentali in una valutazione di questo tipo.

La distribuzione spaziale del coefficiente di dispersione intermareale D all'interno del dominio analizzato indica la velocità di dispersione propria di un tracciante, comune e conservativo, iniettato nel bacino. Pertanto, il meccanismo di dispersione viene qui assunto, come già detto, per comprendere lo stato di salute della laguna: ad alti valori del coefficiente corrispondono elevate velocità di dispersione e di conseguenza un miglior grado di ricircolo dell'acqua.

Il fatto che D sia rappresentativo soltanto di quanto accade nel primo periodo che segue l'immissione può sembrare limitativo ma ciò non nasce da un'impossibilità o incapacità di riprodurre il fenomeno sul lungo periodo quanto invece da un limite "fisiologico" dell'evento in relazione al tipo di rappresentazione che si è voluto proporre. L'obiettivo è quello di fornire un parametro che possa essere rappresentativo dell'entità del fenomeno dispersivo in ogni singolo punto della laguna, ma questa premessa viene a mancare nel momento in cui si considerino gli effetti maturati in più periodi di marea, quando le particelle, ad ogni nuovo ciclo, partono da punti anche molto distanti tra loro: in queste condizioni il riferimento alla posizione iniziale perde evidentemente il significato.

L'indagine è stata effettuata, sulla laguna di Venezia, accoppiando un modello idrodinamico ad un modello di dispersione; il contributo del vento non è stato considerato anche se, in realtà, esso influisce sulla dispersione delle particelle attraverso le onde che crea. Inoltre non sono stati considerati i gradienti di densità e la marea data in input al modello *Idrodinamico* non è la vera e propria marea. Tuttavia i risultati sono coerenti con le aspettative e le previsioni.

L'analisi ha evidenziato come la dispersione sia notevolmente influenzata dalla scelta del momento in cui effettuare l'immissione del tracciante. Le immissioni al colmo dell'onda di marea producono dispersione più accentuata perchè l'immediato riflusso delle acque verso il mare aperto aumenta le possibilità per il soluto di avvicinarsi alle tre zone di uscita verso il mare (le bocche di

Lido, Malamocco e Chioggia), dove si registrano le correnti più intense. Al contrario, il fenomeno è più contenuto per le immissioni al cavo che, con la crescita dei livelli, vedono fin da subito l'allontanamento delle particelle dalle bocche della laguna con conseguenti minori possibilità di un successivo riavvicinamento alle stesse.

Si è definito, quindi, un coefficiente di dispersione intermareale medio che consente una lettura d'insieme della laguna, svincolata dalle problematiche legate ai tempi di immissione, approssimativa ma allo stesso tempo molto significativa.

I risultati ricavati dal presente lavoro dimostrano come la laguna di Venezia, dei primi anni del 1900, godesse di un buon rinnovo idrico in gran parte della sua superficie, soprattutto in prossimità delle bocche e nella parte centrale. Tuttavia erano presenti anche zone caratterizzate da scarso riciclo idrico concentrate in principal modo nella laguna superiore, ricoperta da numerose valli da pesca, e lungo il lato ovest della laguna centro-inferiore, dove si estendevano parecchie barene.

Confrontando questi risultati con quelli ottenuti dallo studio compiuto sulla laguna di Venezia nei primi anni del 2000 si osservano immediatamente delle diversità interessanti: i coefficienti di dispersione intermareale assumono valori più elevati attorno alle bocche (rispetto al passato) ma la particolare raffigurazione "ramificata" è sparita. La causa di questo cambiamento è da attribuire alla progressiva scomparsa dell'articolato tessuto morfologico proprio della laguna degli anni passati, che incrementava il ruolo dei fenomeni dispersivi.

Purtroppo, come è stato spiegato nel capitolo 3 ed è visibile nelle rappresentazioni grafiche del capitolo 9, la laguna di Venezia sta cambiando perdendo le sue forme originali, caratterizzate da fondali poco profondi, innervati da una potente rete di canali. La configurazione ipotetica della laguna del 2050, ricavata applicando l'erosione prevista per i prossimi decenni alla batimetria lagunare del 2003, conferma ancora una volta le infelici previsioni di quelli che sostengono che, se non si prenderà coscienza di questi fatti, con molta probabilità nel futuro si dovrà parlare di *laguna al tramonto*, profondamente trasformata soprattutto dall'opera poco preveggenze dell'uomo moderno.

Bibliografia

- AVANZI Corrado, FIORILLO Gaetano, *Modello di dispersione bidimensionale intermareale della laguna di Venezia*, Istituto di Idraulica dell'Università di Padova.
- CANIATO Giovanni, TURRI Eugenio, ZANETTI Michele, *La laguna di Venezia*, Cierre, Verona, 1995.
- CAROLLO Livio, tesi di laurea specialistica inedita, *Studio del fenomeno della dispersione intermareale nella laguna di Barbamarco*, Università di Padova, A.A. 2011-2012, Relatore: Prof. Ing. Andrea Defina.
- D'ALPAOS Luigi, *L'evoluzione morfologica della laguna di Venezia attraverso la lettura di alcune mappe storiche e delle sue carte idrografiche*, Comune di Venezia - Istituzione centro previsione e segnalazioni maree, archivio di stato di Venezia, 2010.
- VINCI Federica, tesi di laurea specialistica inedita, *Distribuzione spaziale del coefficiente di dispersione intermareale nella laguna di Venezia passata, presente e futura*, Università di Padova, A.A. 2012-2013, Relatori: Prof. Ing. Andrea Defina e Prof. Ing. Luca Carniello.
- GUERZON Stefano, TAGLIAPIETRA Davide, *Atlante della laguna: Venezia tra terra e mare*, Forpress, Padova per conto di Marsilio - Venezia, 2006.
- LANZONI Stefano, *Le equazioni della meccanica dei fluidi*, Università di Padova, consultabile all'URL: www.image.unipd.it/s.lanzoni/teaching/PDF/Meccanica_Fluidi.pdf
- MATTICCHIO Bruno, *Incidenze 2.1-Manuale*, Padova, 2010.
- RINALDO Andrea, *Il governo dell'acqua*, Marsilio, Venezia, 2009.
- ZOCCARATO Claudia, tesi di laurea specialistica inedita, *Spatial distribution of tidally-averaged diffusion coefficient in the Venice lagoon*, Università di Padova, A.A. 2011-2012, Relatore: Prof. Ing. Andrea Defina.

Sitografia:

- *Atlante della laguna di Venezia*, consultabile on line all'URL: www.silvenezia.it
- *Ecosistema*, consultabile on line all'URL: www.salve.it/it/eco