



Via Karl Ludwig von Bruck, 3
34143 TRIESTE
www.porto.trieste.it

PIANO REGOLATORE DEL PORTO DI TRIESTE

Giugno 2014

Studio Ambientale Integrato

Rev.1

Settembre 2014

Quadro di Riferimento Ambientale

Allegato 2 – Componente Acque Marine

Modello Matematico DELFT3D

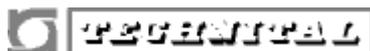
Responsabile Unico del Procedimento

Ing. Eric Marcone

Elaborazione del Piano Regolatore Portuale

Fino a luglio 2014 elaborazione: Segretario Generale f.f. Walter Sinigaglia

Fino al 2010 elaborazione: Segretario Generale dott. Martino Conticelli



ACQUA
TECNO

Dott. Ing. Francesco Mattarolo

Dott. Arch. Vittoria Biego



Revisione 1 conseguente alla richiesta di integrazioni formulata dal Ministero dell' Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare con nota prot. n. U.prot DVA-2014-0010057 del 09/04/2014 - [ID-VIP: 2046] Piano regolatore portuale di Trieste. Procedura di VIA integrata VAS ai sensi dell' art. 6 comma 3 ter del D.Lgs. 152/2006. Richiesta integrazioni

REVISIONE	DATA	ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO
0	Luglio 2013			
1	Settembre 2014	G. Menel Lemos	V. Biego C. Paneghetti	V. Biego F. Mattarolo
2				
3				

NOME FILE
MI026S-STRTO23-1-SAI
ALL.2-Modello
DELFT3D.doc

AUTORITA' PORTUALE DI TRIESTE

PIANO REGOLATORE DEL PORTO DI TRIESTE STUDIO AMBIENTALE INTEGRATO

QUADRO DI RIFERIMENTO AMBIENTALE

ALLEGATO 2 COMPONENTE ACQUE MARINE MODELLO MATEMATICO DELFT3D

Settembre 2014

INDICE

1. PREMESSA.....	4
2. IL SOFTWARE MATEMATICO DELFT3D.....	5
2.1. Il modulo idrodinamico Delft3D-FLOW.....	6
2.1.1. Equazioni e ipotesi di base del modello 3D-FLOW.....	8
2.2. Il modulo per la qualità delle acque Delft3D-WAQ.....	13
2.2.1. I principi di base del modello di qualità delle acque.....	14
2.2.2. L'ossigeno disciolto, il BOD-COD.....	22
2.3. Il modulo Delft3D-SED per il trasporto dei sedimenti.....	25

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2-1 - Esempio di suddivisione di un lago in celle di calcolo. In questo caso è stata utilizzata una griglia di calcolo strutturata 3-dimensionale.....	16
Figura 2-2 - Esempio di schematizzazione di un estuario con 11 celle di calcolo e 5 celle al contorno (indicate con numeri negativi).....	16

1. PREMESSA

Il presente allegato alla componente acque marino costiere risponde alla richiesta di integrazione n. 41, punto 1 del Parere formulato dal Ministero dell' Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) con nota U prot. DVA 2014 0010057 del 09/04/2014.

Nella suddetta richiesta si richiede di integrare la documentazione con: *una scheda del modello idrodinamico DELF3D utilizzato per le simulazioni delle acque marino-costiere, in cui vengano descritti sinteticamente i moduli utilizzati per le diverse simulazioni di idrodinamica, ricambio idrico, ossigeno disciolto, solidi sospesi.*

2. IL SOFTWARE MATEMATICO DELFT3D

Il software matematico Delft3D è un sistema integrato di modelli matematici per la modellazione idrodinamica, dei processi di trasporto, morfologici, biologici e di qualità delle acque in un generico ambiente acquatico di tipo fluviale, lacustre o costiero.

Il software Delft3D è costituito da una serie di moduli interconnessi ognuno dei quali preposto a trattare ed a risolvere un particolare aspetto dei processi in esame. I vari moduli possono essere utilizzati in modo indipendente oppure in modo combinato con uno o più moduli. In questo caso lo scambio dinamico di informazioni tra le diverse componenti è gestito in modo automatico dal software attraverso dei file speciali di comunicazione.

Il cuore del software è costituito dal modulo idrodinamico 3D-FLOW, elemento di base per tutti gli altri moduli, in grado di risolvere le equazioni del moto dei fluidi e di simulare il comportamento idrodinamico in termini di flussi e livelli di un ambiente acquatico sottoposto a diversi tipi di forzanti esterne.

Il modello idrodinamico, inoltre, può simulare i processi di trasporto di traccianti conservativi e non, ed la dinamica del trasporto dei sedimenti in sospensione e sul fondo, includendo anche l'evoluzione morfologica dei fondali.

Gli altri moduli che compongono il software matematico Delft3D sono:

- Delft3D-WAVE il modello spettrale basato sullo SWAN per lo studio della propagazione del moto ondoso attraverso fondali caratterizzati da una morfologia irregolare.
- Delft3D-PART, il modello lagrangiano particolarmente adatto per lo studio dei fenomeni di trasporto e dispersione di sostanze conservative e non, nel campo vicino.
- Delft3D-WAQ, il modello euleriano per lo studio nel campo medio e lontano dei processi di trasporto (avvezione, diffusione e dispersione) e di tipo fisico, (bio) chimico e biologico che avvengono nell'acqua e determinano lo stato qualitativo di un corpo idrico
- Delft3D-SED, il modulo per il trasporto dei sedimenti, che può essere utilizzato indipendentemente o in modo combinato con il Delft3D-WAQ
- Delft3D-ECO, il modulo ecologico che permette di simulare i processi di interazione tra acqua, sedimenti, qualità delle acque e componenti biotiche presenti nel sistema nello spazio nel tempo.

Le descrizioni dei moduli che compongono il software Delft3D è riportata in modo più esteso ed approfondito nei seguenti paragrafi.

2.1. Il modulo idrodinamico Delft3D-FLOW

Il modello idrodinamico 3D-FLOW simula flussi e fenomeni di trasporto indotti dal regime mareale o da particolari situazioni meteorologiche in regime di moto vario sia con schematizzazioni bidimensionali che tridimensionali compresi gli effetti delle differenze di densità dovute a temperature non uniformi o alla distribuzione di salinità.

Il modello idrodinamico può essere utilizzato per ricostruire le caratteristiche del flusso in mari poco profondi, in aree costiere, estuari, lagune, fiumi e laghi. Lo scopo principale è quindi quello di ricostruire i fenomeni di flusso in quei sistemi per i quali la dimensione orizzontale e la scala dei tempi sono significativamente maggiori rispetto alle dimensioni verticali.

Se il fluido è verticalmente omogeneo, un approccio di tipo bidimensionale con i valori dei parametri mediati lungo la verticale è il sistema di calcolo più appropriato. 3D-FLOW è in grado di simulare un campo di moto bidimensionale (schematizzando un solo strato di calcolo) che corrisponde a risolvere le equazioni del moto mediate sulla profondità. Esempi in cui il flusso bidimensionale può essere applicato sono l'analisi della propagazione delle onde di marea, rigonfiamenti per tempeste, propagazione delle onde di tsunami, oscillazioni dei porti o di bacini acquei chiusi (sesse) e trasporto di inquinanti in corpi idrici ben mescolati verticalmente.

La modellazione tridimensionale è di particolare interesse nei problemi di trasporto dove il campo di flusso mostra delle variazioni significative nella direzione verticale. Questa variazione può essere generata dall'azione del vento, dall'attrito del fondo, dalla forza di Coriolis, dalla topografia del fondo o da differenze di densità. Esempi caratteristici sono la dispersione di acque di scarico o di raffreddamento in laghi o aree costiere, intrusione salina negli estuari, scarico di acque dolci provenienti da fiumi in baie marine e stratificazione termica in laghi e mari.

Il modello 3D-FLOW include funzioni matematiche che tengono conto dei seguenti fenomeni fisici:

- Gradienti della superficie libera (effetti barotropici)
- Effetti della rotazione terrestre (forza di Coriolis)
- Acqua con densità variabile (equazioni di stato)
- Gradienti orizzontali di densità (effetti baroclinici)

- Turbolenza indotta dai flussi (turbolenza di massa e di quantità di moto – modello di chiusura della turbolenza)
- Trasporto del sale e di altre sostanze conservative - , scambio di calore.
- Forzante dovuta all'oscillazione mareale al contorno libero
- Sforzo tangenziale sulla superficie liquida dovuto al vento, variabile nello spazio e nel tempo
- Sforzo tangenziale sul fondo variabile nello spazio
- Pressione atmosferica sulla superficie liquida, variabile nello spazio e nel tempo
- Processo di allagamento ed emersione dei bassifondi soggetti a marea
- Scambio di calore attraverso la superficie libera
- Processi di pioggia ed evaporazione
- Forze generate dalla marea
- Effetti di flussi secondari nelle equazioni della quantità di moto nel caso bidimensionale e scabrezza laterale lungo i muri verticali
- Influenza delle onde sulla scabrezza di fondo (2D e 3D), sforzi indotti dalle onde e flussi di massa (solo nel caso bidimensionale) attraverso strutture idrauliche.

2.1.1. Equazioni e ipotesi di base del modello 3D-FLOW

Il modello matematico 3DFLOW risolve le equazioni di moto vario in due (valori medi sull'altezza) o in tre dimensioni considerando un sistema costituito dalle equazioni orizzontali del moto, l'equazione di continuità e le equazioni di trasporto.

Queste equazioni possono essere riferite ad un sistema di coordinate ortogonali curvilinee o ad un sistema di riferimento sferico globale. Le maglie rettangolari sono considerati come una forma semplificata di un sistema a maglie curvilinee.

In un sistema a maglia curvilinea, la superficie libera e la batimetria sono riferite ad un piano orizzontale di riferimento, mentre utilizzando il sistema di riferimento sferico il piano di riferimento segue la curvatura terrestre.

Per completezza vengono riportate di seguito le equazioni fondamentali che governano l'idrodinamica di un sistema.

L'equazione della continuità (mediata sulla profondità) in coordinate curvilinee ortogonali lungo il piano orizzontale è la seguente:

$$\frac{\partial(\zeta)}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial[\sqrt{G_{\eta\eta}}(d + \zeta)u]}{\partial \xi} + \frac{\partial[\sqrt{G_{\xi\xi}}(d + \zeta)v]}{\partial \eta} \right\} = Q$$

con Q = quantità sorgente per unità di superficie dovuta a scarichi o prelievi d'acqua, precipitazione e evaporazione.

Le equazioni della quantità di moto nelle direzioni ξ e η sono le seguenti:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + \\ - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \zeta} - fv = -\frac{1}{\rho\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} + F_{\xi} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_{\xi} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \\ - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fu = -\frac{1}{\rho\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} + F_{\eta} + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_{\eta} \end{aligned}$$

Per una maggiore comprensione dell'equazione precedente si riporta la spiegazione dei principali simboli in essa contenuti:

- $\xi, \eta =$ coordinate curvilinee orizzontali [m]
- $\zeta =$ livello del pelo libero sopra il piano di riferimento [m]
- $d =$ profondità [m]
- $\sigma =$ coordinate verticali scalate valutate come funzione della profondità e del livello del pelo libero (d, ζ)
- $u, v =$ componenti orizzontali della velocità [m/s]
- $\omega =$ componente nel sistema ξ, η delle velocità nella direzione ξ, η [m/s]
- $\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}} =$ coefficienti per trasformare coordinate curvilinee in coordinate rettangolari [m]
- $\Pi_{\xi}, \Pi_{\eta} =$ gradiente pressione orizzontale nelle direzioni ξ e η ;
- $\Phi_{\xi}, \Phi_{\eta} =$ corrispondono alle "tensioni tangenziali" di Reynolds;

L'effetto della variazione di densità è considerato solo nel termine del gradiente di pressione orizzontale, Π_{ξ} e Π_{η} (approssimazione di Boussinesq).

La profondità è assunta essere molto minore della scala delle lunghezze orizzontale e quindi si può ritenere valida l'approssimazione che usualmente si utilizza per "acque basse" per la quale l'equazione della quantità di moto verticale si riduce alla relazione della pressione idrostatica:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H$$

In questo modo si assume che le accelerazioni verticali siano piccole paragonate all'accelerazione di gravità e possano quindi non essere prese in considerazione.

L'equazione di trasporto è formulata in coordinate curvilinee ortogonali lungo il piano orizzontale e in un sistema di coordinate σ lungo la verticale.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(d+\zeta)c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial[\sqrt{G_{\eta\eta}}(d+\zeta)uc]}{\partial \xi} + \frac{\partial[\sqrt{G_{\xi\xi}}(d+\zeta)vc]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial \omega c}{\partial \sigma} = \\ & \frac{d+\zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[D_H \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right] \right\} + \\ & \frac{1}{d+\zeta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[D_v \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right] - \lambda_d(d+\zeta)c + S \end{aligned}$$

con λ_d che rappresenta il processo di decadimento del primo ordine e S la quantità sorgente per unità di superficie dovuta a scarichi o prelievi d'acqua.

Per una maggiore comprensione dell'equazione precedente si riporta la spiegazione dei principali simboli in essa contenuti:

$\xi, \eta =$ coordinate curvilinee orizzontali [m]

$\sigma =$ coordinate verticali scalate valutate come funzione della profondità e del livello del pelo libero (d, ζ)

u, v = componenti orizzontali della velocità [m/s]

$\omega =$ componente nel sistema \square delle velocità nella direzione \square
 \square [m/s]

$\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}} =$ coefficienti per trasformare coordinate curvilinee in
coordinate rettangolari [m]

D_H e $D_V =$ Coefficienti di dispersione orizzontale e verticale [m^2/s]

Il coefficiente di diffusione orizzontale viene usualmente considerato costituito da 3 parti: una parte dovuta alla “turbolenza 2D”, una parte dovuta alla “turbolenza 3D” ed una parte dovuta alla diffusione molecolare.

La parte 2D è associata al rimescolamento dovuto a moti e forze orizzontali che non possono essere risolte dalla maglia orizzontale (sub-grid scale turbulence). La parte 3D si riferisce alla turbolenza tridimensionale ed è legata alla viscosità dinamica che è valutata seguendo il modello di chiusura della turbolenza.

Indicando questi 3 termini con D_{2d} , D_{3d} e D_{mol} , si può dire che:

$$D_H = D_{2d} + D_{3d} + D_{mol}$$

La somma degli ultimi 2 termini costituisce il coefficiente di diffusione verticale:

$$D_V = D_{3d} + D_{mol}$$

Nel caso di simulazioni strettamente bi-dimensionali, l'unico coefficiente di diffusione che rimane è D_H .

Per le simulazioni eseguite nel presente studio sono state fatte alcune assunzioni e semplificazioni di seguito brevemente riportate:

- E' stato adottato un approccio di tipo bidimensionale con i valori dei parametri mediati lungo la verticale.

- Il modulo FLOW viene utilizzato non accoppiato ad altri moduli, e quindi, si assume che il fondo sia fisso.
- L'effetto della curvatura terrestre non è stata considerata e il parametro di Coriolis è stato assunto uniforme.
- Considerando la scala delle analisi effettuate, per la simulazione degli sforzi tangenziali la scabrezza laterale lungo i contorni chiusi non è stata presa in considerazione (free slip).
- Il flusso attraverso contorni chiusi o attraverso il fondo è pari a zero.
- La procedura di allagamento ed emersione comporta un movimento discontinuo del contorno bagnato dei bassifondi o delle barene. Una cella interna a zone che possono essere considerate emerse, viene considerata secca quando i quattro vertici della cella lungo i lati della cella sono considerati secchi o quando la profondità al centro della cella diventa negativa (volume negativo). Un vertice viene considerato “secco” quando la profondità dell'acqua diviene inferiore alla metà di un valore di soglia pari a 0.05 m. Se il punto viene considerato “secco”, la velocità in quel punto viene assunta uguale a zero. Il punto viene riconsiderato bagnato quando la profondità d'acqua nel punto ritorna superiore al valore di soglia definito.
- Le forzanti del flusso sono la marea in corrispondenza dei contorni aperti, la forza del vento sulla superficie libera. Punti di immissione sono inclusi nel modello per simulare gli scarichi di acqua dolce nel sistema.
- I gradienti di densità (baroclinici) e i gradienti di pressione sulla superficie libera (barotropici) non sono stati considerati.

2.2. Il modulo per la qualità delle acque Delft3D-WAQ

Il Delft3D-WAQ è un modello matematico 3 dimensionale per lo studio della qualità delle acque, in grado di riprodurre tutti i principali processi di tipo fisico, (bio) chimico e biologico che avvengono in un ambiente acquatico marino/fluviale e di determinare quindi l'evoluzione sia nello spazio che nel tempo dei principali parametri chimici e biologici che descrivono da un punto di vista qualitativo lo stato del corpo idrico.

Il modello utilizza come base di riferimento per il calcolo dei processi, il database idrodinamico generato dal corrispettivo modulo idrodinamico Delft3D-FLOW, in cui sono registrati, per ciascun cella di calcolo ed in molteplici istanti di tempo, le informazioni idrodinamiche riguardanti i flussi, i livelli del tirante idrico, la temperatura, la salinità, la viscosità e la diffusività.

Le grandezze fisiche e le sostanze simulate dal modello comprendono una vasta gamma di sostanze e variabili di stato tra cui:

- le sostanze conservative (salinità, i cloruri, traccianti generici)
- le sostanze non conservative soggette ad un decadimento nel tempo
- i sedimenti in sospensione
- la temperatura
- i nutrienti (ammoniaca, nitrati, fosfati e silicati)
- le sostanze organiche (suddivise nelle frazioni di carbonio, fosforo, e silicio)
- l'ossigeno disciolto
- il BOD ed il COD (rispettivamente Biological and Chemical Oxygen Demand)
- le alghe
- i batteri
- i metalli pesanti
- i micro inquinanti organici

All'interno del modello Delft3D-WAQ sono disponibili delle librerie di calcolo predefinite che descrivono i principali processi di tipo fisico, chimico, biochimico e biologico che avvengono nel corpo idrico.

Questi processi, possono essere selezionati dall'utente in funzione del tipo di problema oggetto di studio. I più importanti processi (ma non gli unici) inclusi nella libreria sono:

- la deposizione ed il risollevarmentodei sedimenti in sospensione
- la re-areazione attraverso la superficie libera
- la crescita e la mortalità algale
- la mineralizzazione delle sostanze organiche
- le nitrificazione e la de-nitrificazione
- l'adsorbimento dei metalli pesanti
- la volatilizzazione dei micro inquinanti organici

Il modello è caratterizzato da una grande versatilità e può essere applicato in molteplici situazioni laddove sia richiesto lo studio di uno o più dei parametri sopra citati.

Esempi tipici di applicazione del modello Delft3D-WAQ sono lo studio di fenomeni di eutrofizzazione, lo studio del consumo dell'ossigeno disciolto in ambienti stratificati, l'impatto di uno scarico fognario sulla concentrazione dei nutrienti e sulla produzione primaria, il trasporto di metalli pesanti in un estuario, etc..

2.2.1. I principi di base del modello di qualità delle acque

La base concettuale di funzionamento del modello Delft3D-WAQ per lo studio della qualità delle acque è rappresentato dal set di equazioni matematiche di avvezione-diffusione-reazione (“*advection-diffusion-reaction equation*”).

Attraverso questa rappresentazione matematica è infatti possibile riprodurre tutti i processi fisici di trasporto delle sostanze considerate (avvezione e diffusione) e i fenomeni di interazione tra le varie sostanze (reazione).

Il modello è basato su una discretizzazione spaziale degli elementi di calcolo e su una discretizzazione temporale del time step di calcolo, sulla quale è possibile risolvere con algoritmi numerici le equazioni fondamentali di avvezione-diffusione-reazione.

La discretizzazione spaziale:

La discretizzazione spaziale del dominio di calcolo è costituito da un complesso di celle o segmenti di calcolo che rappresentano fisicamente delle porzioni del dominio di calcolo. Queste celle di calcolo possono coincidere con le celle definite nel modulo idrodinamico oppure possono essere derivate da una aggregazione anche non uniforme delle celle di calcolo idrodinamiche.

Nel Delft3D-WAQ ogni cella di calcolo è caratterizzata da delle dimensioni proprie in una due o tre dimensioni in funzione del tipo di schematizzazione prescelta. Ogni cella di calcolo è identificata da un numero univoco e condivide con le celle confinanti una o più superfici attraverso le quali avvengono gli scambi di massa e delle sostanze.

Quindi, per ciascuna cella di calcolo sono noti:

- Il volume
- Le dimensioni
- Le superfici di scambio
- Le celle di calcolo confinanti con cui è condivisa una superficie di scambio

La risoluzione dell'equazioni di trasporto e di reazione per ciascuna cella di calcolo permette quindi lo studio dell'evoluzione nello spazio e nel tempo dei principali parametri e variabili che descrivono la qualità del corpo acqueo.

Si noti che il modello è particolarmente versatile nella definizione delle geometrie delle celle di calcolo, ed è quindi possibile predisporre all'interno del dominio di calcolo delle celle di calcolo con dimensioni e forma non uniformi sia nel piano orizzontale che nella verticale.

Il modello presuppone comunque come ipotesi fondamentale di funzionamento, la conoscenza a priori dell'idrodinamica in termini di flussi e livelli in ciascuna cella di calcolo ad in ogni istante temporale, elemento essenziale per calcolare il trasporto di massa attraverso le superfici di scambio.

In Figura 2-1 e in Figura 2-2 sono riportati degli esempi delle schematizzazioni della griglia di calcolo utilizzate dal Delft3-WAQ.

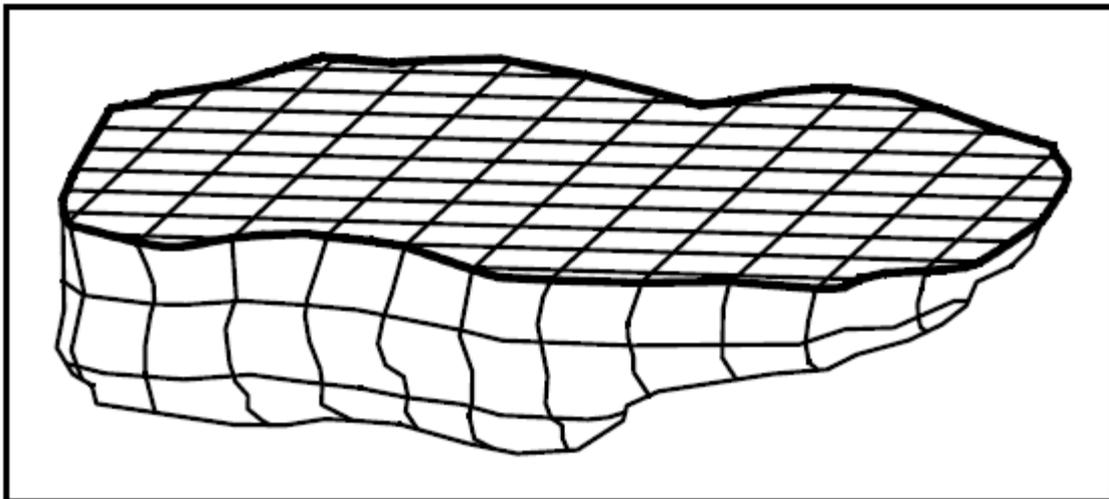


FIGURA 2-1 - ESEMPIO DI SUDDIVISIONE DI UN LAGO IN CELLE DI CALCOLO. IN QUESTO CASO È STATA UTILIZZATA UNA GRIGLIA DI CALCOLO STRUTTURATA 3-DIMENSIONALE

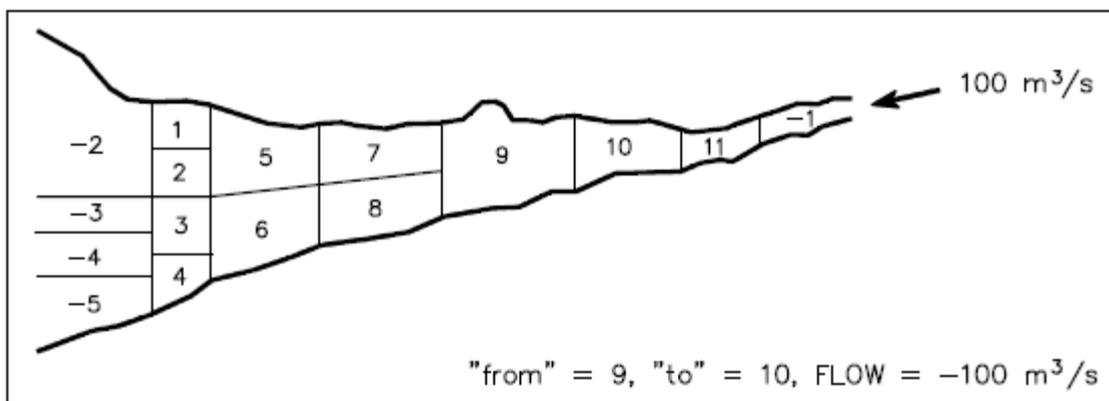


FIGURA 2-2 - ESEMPIO DI SCHEMATIZZAZIONE DI UN ESTUARIO CON 11 CELLE DI CALCOLO E 5 CELLE AL CONTORNO (INDICATE CON NUMERI NEGATIVI)

Le equazioni fondamentali del modello

Le equazioni fondamentali che governano il modello di qualità delle acque sono costituite da:

- l'equazione di bilancio di massa
- l'equazione di avvezione-dispersione per il trasporto delle sostanze
- il set di equazioni che descrivono i processi di reazione/iterazione di ciascuna sostanza/variabile di stato con le altre sostanze.

Il modello Delft3D-WAQ gestisce il bilancio di massa per ciascuna delle variabili/sostanze modellizzate (quali ad esempio l'ossigeno disciolto, i nitrati, il cadmio, i sedimenti, etc..) in riferimento a ciascuna cella o volume di calcolo.

In termini matematici, il bilancio di massa si traduce nella chiusura dell'equazione di continuità ad ogni istante temporale tenendo in considerazione i flussi che avvengono tra celle confinanti, i termini di perdita/sorgente, ed i processi di trasformazione delle sostanze per l'iterazione con altri elementi.

L'equazione di bilancio di massa per ciascuna cella di calcolo è:

$$M_i^{t+\Delta t} = M_i^t + \Delta t \times \left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_{Tr} + \Delta t \times \left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_P + \Delta t \times \left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_S$$

in cui:

M_i^t è la massa al tempo t nella cella i -esima

$M_i^{t+\Delta t}$ è la massa al tempo $t + \Delta t$ nella cella i -esima

$\left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_{Tr}$ è la variazione di massa dovuto al trasporto

$\left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_P$ è la variazione di massa dovuto alle reazioni fisiche, (bio)chimiche e biologiche

$\left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_S$ è la variazione di massa dovuto ai termini sorgente e alle perdite (scarichi, immissioni fluviali, punti di prelievo,...)

Il termine della variazione di massa dovuta al trasporto includesia il trasporto di tipo avveztivo, cioè dovuto ai flussi di acqua, che di tipo diffusivo/dispersivo dovuto viceversa ai gradienti di concentrazione ed alle turbolenze idrodinamiche.

I flussi di acqua attraverso le celle confinanti sono genericamente derivati dagli output del modello idrodinamico Delft3D-FLOW.

Il termine di variazione di massa dovuto ai processi biologici, chimici e fisici sonotiene conto dei fenomeni di trasformazione di una sostanza in un'altra e dei processi di produzione/consumo di una sostanza per effetto di reazioni biologiche e biochimiche. Un esempio di questi processi sono la re-areazione attraverso la superficie libera, l'adsorbimento, la nitrificazione-denitrificazione, la produzione primaria e la predazione sul fitoplancton. Anche i processi di deposizione e risospensione dei sedimenti sia di tipo coesivo che non coesivo appartengono a questa categoria.

Il termine di variazione di massa dovuto ai termini sorgente ed alle perdite tiene in considerazione la presenza di scarichi industriali e o civili, delle immissioni fluviali, e dei punti di prelievo. Il modello permette anche la definizione delle condizioni al contorno in termine di concentrazione o massa di ciascuna sostanza.

L'equazione di avvezione-dispersione è composta da due termini che descrivono i due processi di trasporto.

Il trasporto di tipo avveztivo attraverso una generica superficie di scambio è:

$$T_{x_0}^A = v_{x_0} \times A \times C_{x_0}$$

In cui:

$T_{x_0}^A$ è il trasporto di massa advettivo a $x = x_0$ [g/s]

v_{x_0} è la velocità a $x = x_0$ [m/s]

A è l'area della superficie di scambio a $x = x_0$ [m²]

C_{x_0} è la concentrazione a $x = x_0$ [g/m³]

Tutti i termini sono rappresentati di una grandezza media sull'intera sezione scambio. Una definizione più dettagliata della superficie consente dunque una rappresentazione più accurata degli scambi di massa.

Il trasporto di tipo dispersivo attraverso una generica superficie di scambio è:

$$T_{x_0}^D = D_{x_0} \times A \times \left[\frac{\partial C}{\partial x} \right]_{x=x_0}$$

In cui:

$T_{x_0}^D$ è il trasporto dispersivo a $x = x_0$ [g/s]

D_{x_0} è il coefficiente di dispersione a $x = x_0$ [m²/s]

A è l'area della superficie di scambio a $x = x_0$ [m²]

$\left[\frac{\partial C}{\partial x} \right]_{x=x_0}$ è il gradiente di concentrazione a $x = x_0$ [g/m⁴]

La dispersione è calcolata sulla base della legge di Fick per il trasporto per cui il flusso di massa è proporzionale al gradiente di concentrazione ed al coefficiente di dispersione. Questo coefficiente è un parametro di calibrazione del modello e dipende in termini generali dalle caratteristiche idrodinamiche del sistema e dalle dimensioni della griglia di calcolo.

Il gradiente di concentrazione a sua volta è calcolato come la differenza di concentrazione per unità di lunghezza secondo la formula:

$$\left[\frac{\partial C}{\partial x} \right]_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{C_{x+\frac{1}{2}\Delta x} - C_{x-\frac{1}{2}\Delta x}}{\Delta x}$$

A questo punto:

- Sostituendo nella equazione generale del bilancio di massa i termini del trasporto sopra definiti
- dividendo l'equazione per il volume della cella $V = \Delta x \Delta y \Delta z$
- portando l'equazione al limite asintotico $\Delta t \rightarrow 0$ e $\Delta x \rightarrow 0$
- aggiungendo i termini di trasporto relativi a tutte 3 le dimensioni
- aggiungendo i termini di sorgente e di reazione

si ottiene l'equazione generale di avvezione-diffusione-reazione che si scrive nella forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v_z \frac{\partial C}{\partial z} + S + f_R(C, t)$$

in cui:

C è la concentrazione della sostanza/variabile di stato

t è il tempo

D_x, D_y, D_z sono i coefficienti di dispersione nelle tre direzioni considerate

v_x, v_y e v_z sono le velocità nelle tre direzioni

S è il termine sorgente (scarichi civili, industriali, fiumi, impianti di trattamento, punti di prelievo, etc..)

f_R è la funzione che esprime le reazioni e i processi di tipo fisico-chimico e biologico

I processi, in termini generali, possono essere scritti sotto forma di equazioni differenziali del tipo:

$$\left(\frac{\partial \bar{C}_1}{\partial t} \right)_R = f_R(\bar{C}_1, \bar{C}_2, \dots, \bar{C}_n, t)$$

In cui:

\bar{C}_i è la concentrazione ad una data posizione della sostanza i

f_R è una funzione matematica rappresentativa del fenomeno in esame

t il tempo

Sebbene questo tipo di equazione sia molto generica, essa non è tuttavia adeguata a rappresentare alcuni tipi di processi naturali. Tra questi, ad esempio, il più importante è la relazione di equilibrio cinetico della chimica. Ne consegue che solo i processi chimici relativamente lenti possono essere descritti da questotipo di equazione.

Le condizioni al contorno

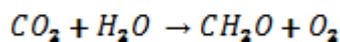
Qualsiasi modello matematico governato da un sistema di equazioni differenziali necessita come dato di input di una serie di condizioni lungo il contorno del modello.

In termini generali, il modello può avere dei contorni chiusi (*closedboundaries*) che non consentono cioè alcun tipo di scambio con il mondo esterno (in questo caso si parla di condizione al contorno naturale) oppure dei contorni aperti (*open boundaries*) che permettono lo scambio di massa e sostanze. La soluzione dell'equazione di avvezione-diffusione richiede questo tipo di condizione al contorno.

Le condizioni al contorno in genere fanno parte dei dati input del modello e vengono specificate direttamente dall'utente. Il modello Delft3D-WAQ tuttavia, attraverso un algoritmo di calcolo (definito come *Thatcher-Harleman time lag*) è in grado di rimodulare le condizioni al contorno nello spazio e nel tempo in modo tale da regolarizzare i flussi attraverso i contorni e smorzare così l'effetto delle condizioni al contorno che, in linea teorica, potrebbero potenzialmente condizionare ed alterare in modo non realistico la risposta del sistema.

2.2.2. L'ossigeno disciolto, il BOD-COD

L'andamento della concentrazione dell'ossigeno disciolto in acqua è strettamente legato al fatto delle sostanze organiche secondo la relazione:



Questa relazione esprime (in modo semplificato) la reazione di fotosintesi nella quale i prodotti finali sono la sostanza organica e l'ossigeno. Per ogni grammo di carbonio incorporato nella sostanza organica 2.67 grammi di O_2 sono generati, derivati dal rapporto tra la massa molare grammi delle masse molari ($32 \text{ g } O_2 / 12 \text{ g } C$). La reazione inversa in cui in cui vengono prodotti anidride carbonica e acqua è il processo di mineralizzazione o degradazione della sostanza organica. Questa reazione è controllata dagli organismi microbici.

La dinamica della concentrazione dell'ossigeno disciolto è regolata dall'azione simultanea di processi di consumo dell'ossigeno in soluzione per l'ossidazione delle sostanze organiche e da processi di re-areazione attraverso la superficie libera che tendono a ristabilire le condizioni di saturazione.

La re-areazione attraverso la superficie dipende dalle condizioni di saturazione del corpo idrico; se la concentrazione dell'ossigeno in soluzione è minore della concentrazione di saturazione l'ossigeno passa dall'atmosfera al corpo idrico, in caso contrario il flusso dell'ossigeno è invertito.

La concentrazione di saturazione dell'ossigeno disciolto in un corpo idrico è un parametro che dipende dalla temperatura e dalla salinità e, generalmente è variabile in funzione della profondità.

Il trasporto di ossigeno all'interno della colonna d'acqua e nel corpo idrico è regolato dai processi di diffusione e dispersione, a loro volta dipendenti dalle caratteristiche idrodinamiche e dalla circolazione nel sistema.

Infine, l'ossigeno in soluzione può essere coinvolto in numerose reazioni di ossidazione chimiche e micro-biologiche ad opera delle sostanze organiche presenti in acqua.

I parametri che rappresentano la quantità di ossigeno necessaria per la completa ossidazione per via chimica dei composti organici ed inorganici presenti in un campione di acqua sono il COD (ChemicalOxygenDemand), il CBOD (carbonaceousbio-chemicaloxygendemand), NBOD (Nitrogenousbiochemicaloxygendemand) ed il BOD (carbonaceous and nitrogenousbiologicaloxygendemand). Comunemente anziché il BOD si utilizza come riferimento il parametri BOD₅ che rappresenta la quantità di ossigeno consumata in un campione di acqua conservato al buio ed alla temperatura di 20°C.

I bilanci di massa per l'ossigeno disciolto per il BOD₅ e il SOD si scrivono come:

$$\frac{\Delta O_2}{\Delta t} = \text{immissioni} + \text{trasporto} + \text{reareazione} + \text{produzione primaria} - \text{mineralizzazione} - \text{risparmio}$$

$$\frac{\Delta CBOD_5}{\Delta t} = \text{immissioni} + \text{trasporto} - \text{deposizione} - \text{mineralizzazione}$$

$$\frac{\Delta SOD}{\Delta t} = \text{immissioni} - \text{deposizione} - \text{mineralizzazione}$$

Il bilancio di massa per il COD è identico a quello del CBOD₅.

Il flusso di re-areazione attraverso l'interfaccia aria-acqua è proporzionale alla costante di re-areazione ed alla differenza di concentrazione tra il livello di ossigeno disciolto ed il livello di saturazione. La costante di re-areazione è una funzione

della velocità della corrente, del vento e della temperatura. La concentrazione di saturazione dell'ossigeno disciolto è una funzione della temperatura e della salinità.

2.3. Il modulo Delft3D-SED per il trasporto dei sedimenti

Il Delft3D-SED è il modulo del sistema integrato di modelli Delft3D per lo studio del trasporto ed ella dispersione dei sedimenti sia coesivi che non coesivi.

Da un punto di vista funzionale questo modello è parte integrante del modello generale Delft3D-WAQ. In questo caso vengono tuttavia considerati esclusivamente i processi che riguardano il trasporto e la diffusione/dispersione dei sedimenti.

I principi di base e lo schema di funzionamento del modello sono dunque gli stessi che regolano il Delft3D-WAQ sia per quanto riguarda la discretizzazione del dominio di calcolo sia nella definizione delle equazioni fondamentali che regolano il sistema.

Il modello distingue due tipologie di sedimenti in funzione delle loro proprietà fisiche e geotecniche:

- i sedimenti caratterizzati da diametri più grossolani con $d > 60 \mu\text{m}$ come le sabbie che hanno un comportamento non coesivo
- i sedimenti più fini con $d < 60 \mu\text{m}$ come i limi e le argille caratterizzati da un comportamento non coesivo

I processi di trasporto dei sedimenti sono di tipo coesivo avvengono per avvezione e per diffusione/dispersione. In aggiunta sono considerati anche i processi di deposizione e di risospensione di sedimenti dal fondo.

Questi processi sono modellizzati secondo la formulazione basata sulle teorie di *Partheniades and Krone*. in cui la tensione tangenziale al fondo riveste un ruolo fondamentale. La deposizione di sedimenti avviene quando la tensione istantanea al fondo è minore della tensione critica di sedimentazione; similmente la risospensione del materiale depositato sul fondo avviene solo quando la tensione istantanea al fondo è superiore alla tensione critica di erosione.

In aggiunta a questi processi il modello può tener conto anche dei processi di rimozione dal fondo per scavamento (*digging*) e di interrimento (*burial*)

I processi di trasporto dei sedimenti non-coesivi possono essere nella forma di trasporto di fondo (*bed-load*) oppure in sospensione (*suspendedload*) in relazione alle dimensioni dei grani ed alle condizioni idrodinamiche.

Il trasporto di fondo avviene per rotolamento, scivolamento e saltellamento dei sedimenti sul fondo ed è legato essenzialmente alle tensioni tangenziali sul fondo.

Il trasporto in sospensione è legato unicamente alle condizioni idrodinamiche locali ed istantanee nonché alle turbolenze del fluido vettore.

Sono implementate numerose formulazioni dei processi di trasporto per i sedimenti non coesivi.

In formule il bilancio di massa di sedimenti nella colonna d'acqua (C_w) e nel layer sul fondo (C_b) si scrive come

$$\frac{\Delta C_w}{\Delta t} = \text{immissioni} + \text{trasporto} - \text{deposizione} + \text{risospensione}$$

$$\frac{\Delta C_b}{\Delta t} = \text{immissioni} + \text{deposizione} - \text{risospensione} + \text{interramento} + \text{scavo}$$

Il bilancio di massa per i sedimenti sabbiosi è espresso come tasso di variazione del livello di fondo :

$$\frac{\Delta Z_b}{\Delta t} = - \frac{1}{1 - \theta} \left(\frac{\Delta S_x}{\Delta x} + \frac{\Delta S_y}{\Delta y} \right)$$

In cui:

Z_b: è il livello del fondo [m]

θ: è la porosità

S: è il tasso di trasporto di sedimenti [m²/s]