



Programma di Ricerca 2004-2007  
Riunione annuale 2006  
LINEA di RICERCA 3.14

# TRASPORTO DI UNA MISCELA BIGRANULARE PER EFFETTO COMBINATO DI MOTO ONDOSO E CORRENTI DI MAREA NELLA LAGUNA DI VENEZIA

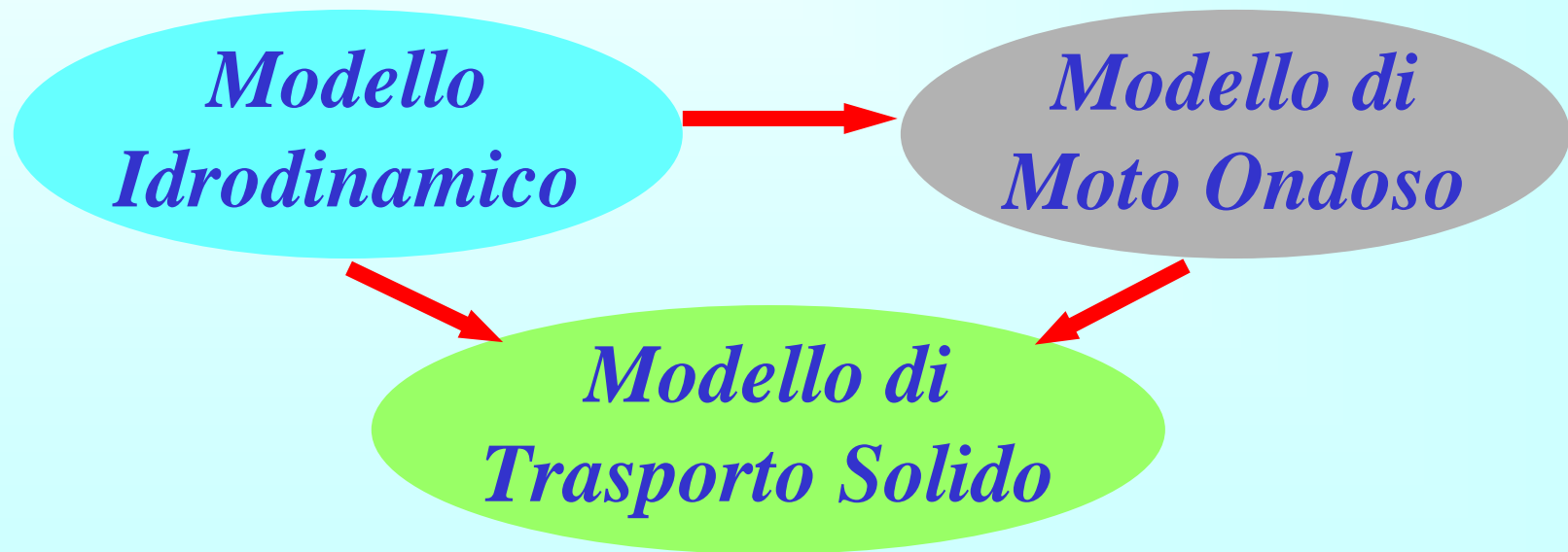
Luca Carniello, Luigi D'Alpaos, Andrea Defina

Università degli studi di Padova  
Facoltà di Ingegneria  
Dipartimento IMAGE



Due tra i principali FENOMENI FISICI che producono RISOSPENSIONE di SEDIMENTI all'interno della LAGUNA di VENEZIA sono:

- le CORRENTI indotte dalla propagazione della MAREA;
- le ONDE da VENTO.



# MODELLO DI TRASPORTO SOLIDO

- ✓ Presenza nei bacini a marea di materiale con comportamento diverso:

Aree nei pressi delle bocche : SABBIA INCOERENTE

Barene e bassifondi: “FANGO” COESIVO

MODELLO “BIGRANULARE”

- ✓ Equazione del Trasporto:

$$\frac{\partial C_i Y}{\partial t} + \nabla \mathbf{q} C_i - \nabla \bullet (\mathbf{D} \nabla C_i) = S_i$$

- $C$ : concentrazione di sedimenti mediata sulla verticale;
- $Y$ : tirante d'acqua effettivo;
- $\mathbf{q}=(q_x, q_y)$ : velocità mediata in fase integrata sulla verticale;
- $S$ : termini sorgente;
- $\mathbf{D}$ : tensore di diffusione turbolenta.
- $i$ : classe granulometrica

- ✓ Ipotesi:

- Trascurabilità del termine diffusivo:

Questa ipotesi è abbastanza usuale nello studio del trasporto di sedimenti in sospensione essendo il termine diffusivo spesso trascurabile rispetto a quello convettivo [*Pritchard and Hogg, 2003*].

- ✓ Termini Sorgente:

$$S_i = E_i - D_i$$

$E_i$ : Entrainment (sabbia/fango rimossi dal fondo e trasportati in sospensione)

$D_i$ : Deposition (sabbia/fango depositati al fondo quando la corrente non è più in grado di mantenerli in sospensione)

# MODELLO DI TRASPORTO SOLIDO

## Ipotesi sulla costituzione del fondale:

- sedimenti coesivi (fanghi):  $D_M = 20 \mu m$ ,  $\tau_{cr,m} = 0.7 \text{ Pa}$ .
- sedimenti incoerenti (sabbia):  $D_S = 150 \mu m$ ,  $\tau_{cr,s} = 0.4 \text{ Pa}$ .
- transizione incoerente/coesivo: percentuale di fango  $p_{m,cr} = 10\%$  [Van Ledden, (2004)]
- assenza di flocculazione [Mignot (1968), Chase (1979)]

## ✓ “ DEPOSITION ”

### Sabbia:

$$D_S = w_s r_0 C_S$$

- $C_S$ ,  $C_M$ : concentrazione in sospensione,
- $w_s$ ,  $w_m$ : velocità di deposizione,
- $r_0 = 2.0$  (Parker, 1987),
- $\tau_b$ : sforzo di attrito al fondo,
- $\tau_{crDEP}$ : sforzo di attrito critico di deposizione (0.5 Pa),
- $He$ : funzione di Heaviside,
- $s$ : densità relativa dei sedimenti ( $r_s/r_w$ ),
- $\nu$ : viscosità cinematica ( $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

### Fango:

$$D_M = w_m C_M \left[ 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{crDEP}} \right] He \left[ 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{crDEP}} \right]$$

- velocità di deposizione (Van Rijn 1984)

$$\left\{ \begin{array}{l} w = \frac{1}{18} \frac{(s-1)gD_s^2}{\nu} \quad D_{50} \leq 100 \mu m \\ w = 10 \frac{\nu}{D_s} \left\{ \left[ 1 + \frac{0.01(s-1)gD_s^2}{\nu^2} \right]^{0.5} - 1 \right\} \quad 100 \mu m < D_{50} \leq 1000 \mu m \\ w = 1.1 \cdot [(s-1)gD_s]^{0.5} \quad D_{50} > 1000 \mu m \end{array} \right.$$

# MODELLO DI TRASPORTO SOLIDO

## ✓ “ENTRAINMENT”

Sforzo di attrito critico:

$$\begin{cases} \tau_{cr,nc} = (1 + p_m) \tau_{cr,s} & \text{se } p_m \leq p_{m,cr} \\ \tau_{cr,c} = \frac{\tau_{cr,sand} (1 + p_{m,cr})^\beta - \tau_{cr,m} (1 - p_m) + \tau_{cr,m}}{1 - p_{m,cr}} & \text{se } p_m \geq p_{m,cr} \end{cases}$$

Comportamento non-coesivo ( $p_m \leq p_{m,cr}$ ):

$$\begin{cases} E_{sand,nc} = (1 - p_m) w_s \cdot 0.015 \frac{D_{50}}{0.01Y} \frac{[(\tau_{b,tot} - \tau_{cr,nc}) / \tau_{cr,nc}]^{1.5}}{D_*^{0.3}} \\ E_{mud,nc} = \frac{p_m}{1 - p_m} M_{nc} T_{nc} \quad \text{con} \quad M_{nc} = 0.025 \frac{\sqrt{(s-1)gD_{50sand}}}{D_*^{0.9}} \end{cases}$$

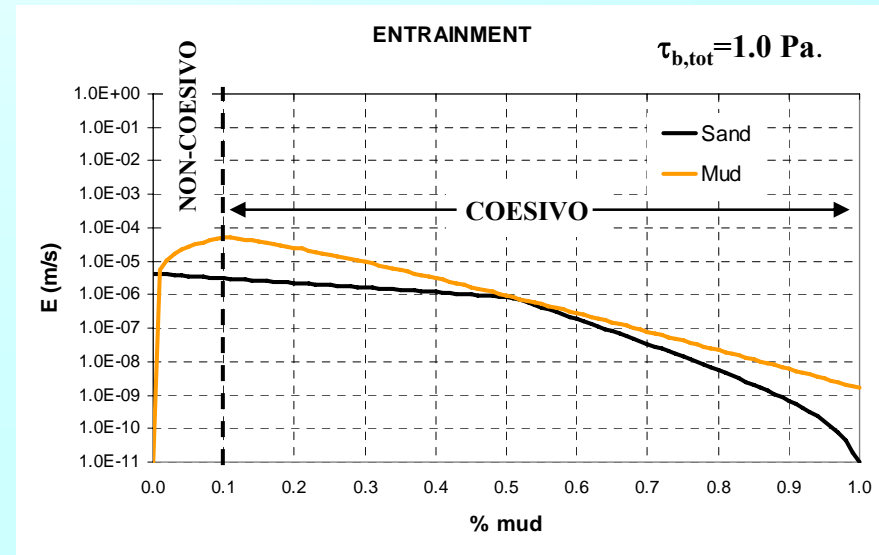
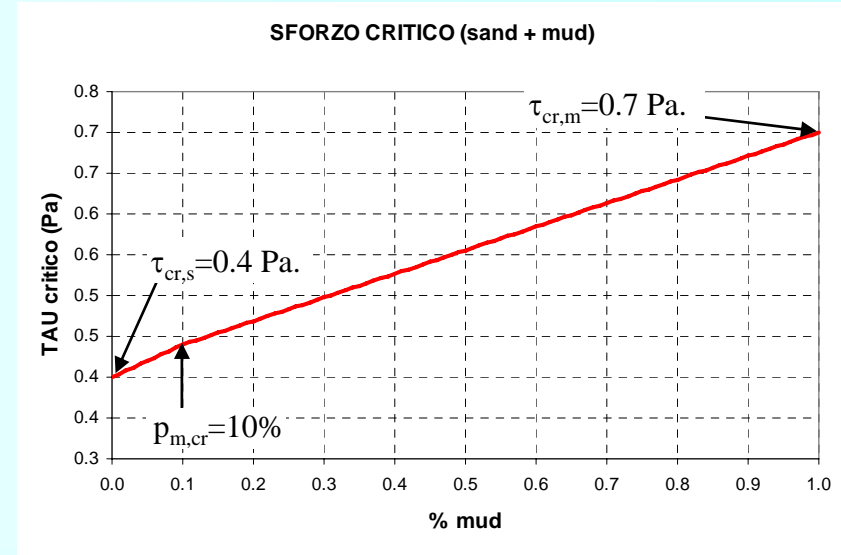
Comportamento coesivo ( $p_m \geq p_{m,cr}$ ):

$$\begin{cases} E_{sand,c} = (1 - p_m) M_c \left( \frac{\tau}{\tau_{cr,c}} - 1 \right) He \left( \frac{\tau}{\tau_{cr,c}} - 1 \right) \\ E_{mud,c} = p_m M_c \left( \frac{\tau}{\tau_{cr,c}} - 1 \right) He \left( \frac{\tau}{\tau_{cr,c}} - 1 \right) \end{cases}$$

dove

$$M_c = \left( \frac{M_{nc}}{M_{mud}} \cdot \frac{1}{1 - p_{m,cr}} \right)^{\frac{1-p_m}{1-p_{m,cr}}} \cdot M_{mud}$$

$$M_{mud} = 0.00001 \text{ kg/m}^2\text{s} \quad [\sim 3.8 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}] \text{ (taratura)}$$



# MODELLO DI TRASPORTO SOLIDO

## ✓ EVOLUZIONE DEL FONDO

Equazione dell'evoluzione altimetrica del fondale:

$$(1-n) \frac{\partial z_{bi}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q}_{bi} = D_i - E_i \quad \checkmark \text{ non consideriamo il trasporto al fondo}$$

Implementazione:

$$\left. \begin{aligned} \Delta z_{bs} &= \frac{D_s - E_s}{1-n} \Delta t \\ \Delta z_{bm} &= \frac{D_M - E_M}{1-n} \Delta t \end{aligned} \right\} \Delta z_b = \Delta z_{bs} + \Delta z_{bm}$$

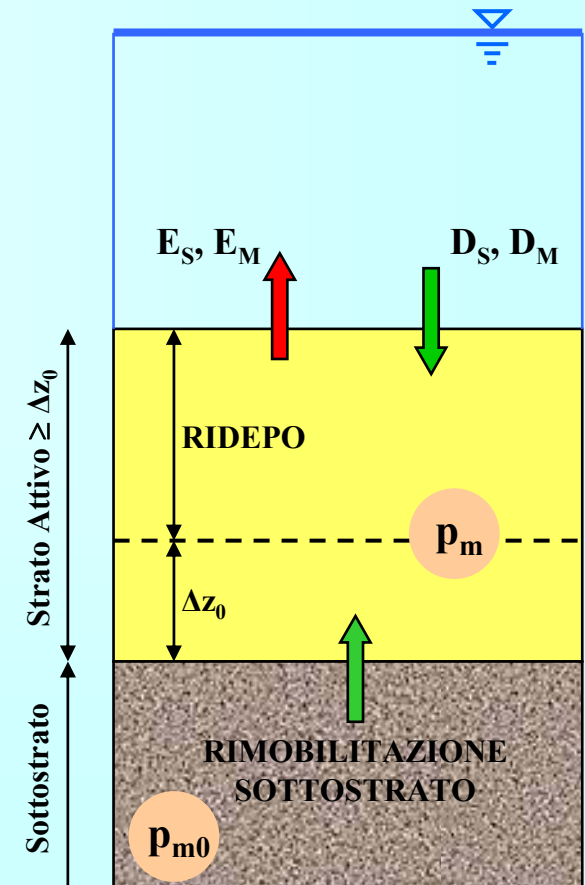
✓ calcolo della percentuale di fango nello strato attivo

$$p_m = \frac{V_{mud} + V_{mud}^I}{V_{TOT}}$$

$V_{mud}$  = Volume di fango "attualmente" nello strato attivo

$V_{mud}^I$  = Volume di fango scambiato nel singolo passo temporale con la colonna liquida e (eventualmente) con il sottostrato originario.

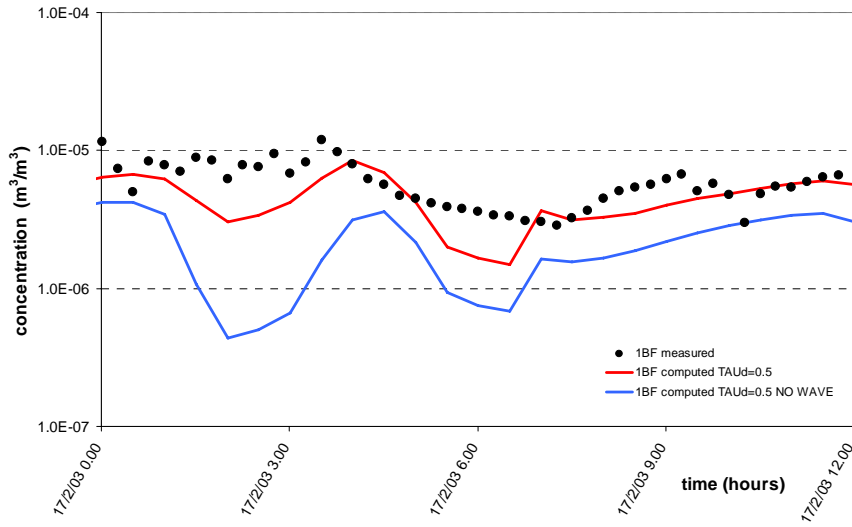
$V_{TOT}$  = Volume totale dello Strato Attivo



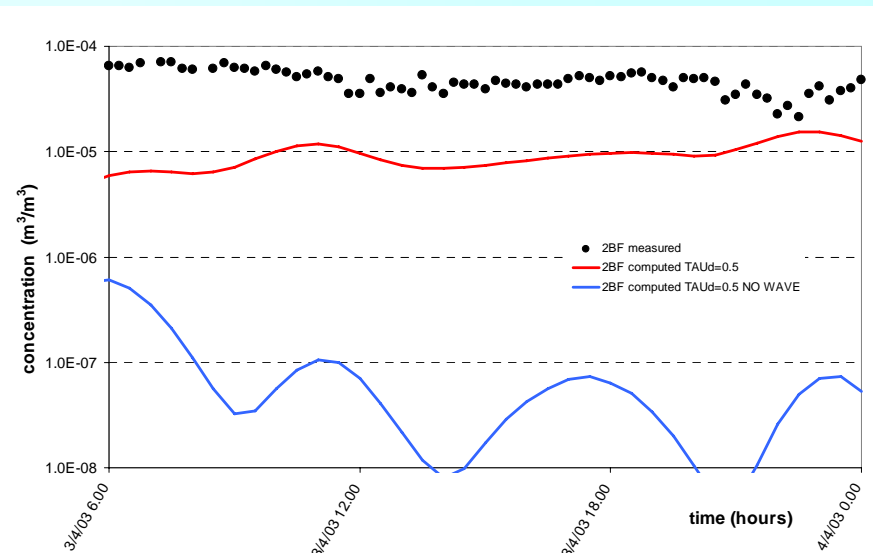
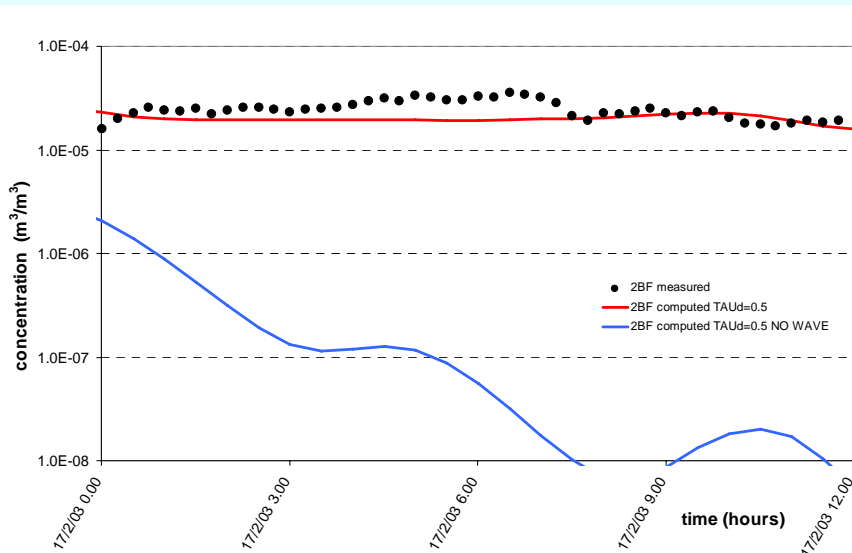
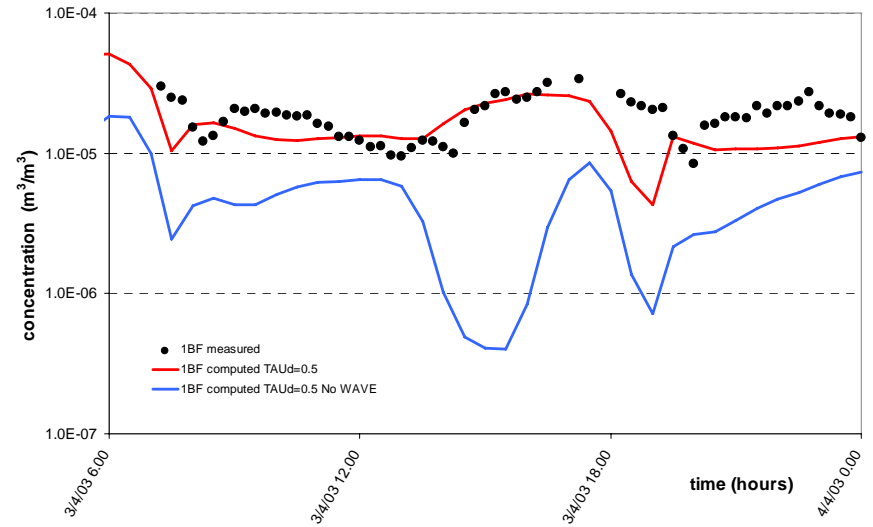
# Modello di TRASPORTO SOLIDO: RISULTATI

Stazione 1BF & 2BF: confronto tra torbidità misurata e calcolata dal modello.

16-17 Febbraio 2003:  $\theta_{\text{wind}} \cong 60^\circ\text{N}$ ;  $U_{\text{wind}} \cong 10\div 12$  m/s

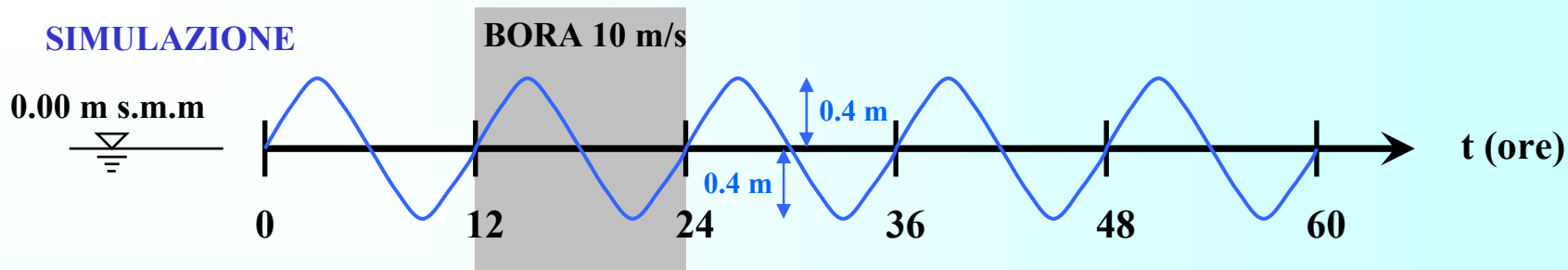


3 Aprile 2003:  $\theta_{\text{wind}} \cong 45^\circ\text{N}$ ;  $U_{\text{wind}} \cong 12\div 16$  m/s



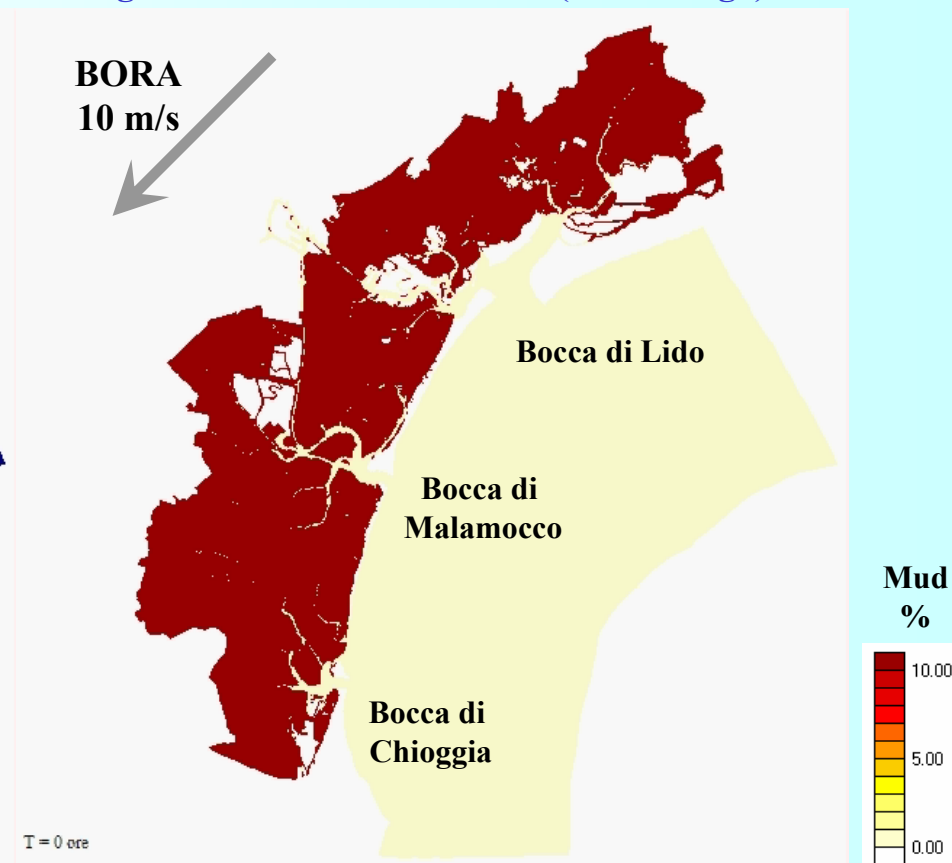
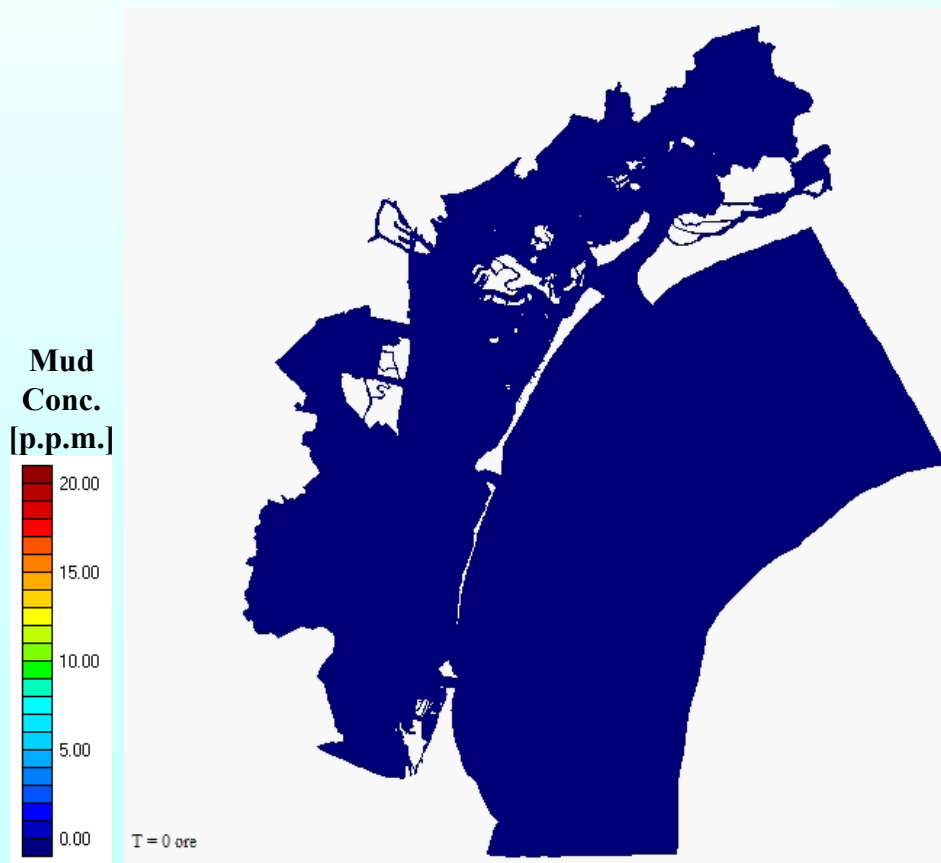
# Modello di TRASPORTO SOLIDO: Applicazione alla Laguna ATTUALE

SIMULAZIONE



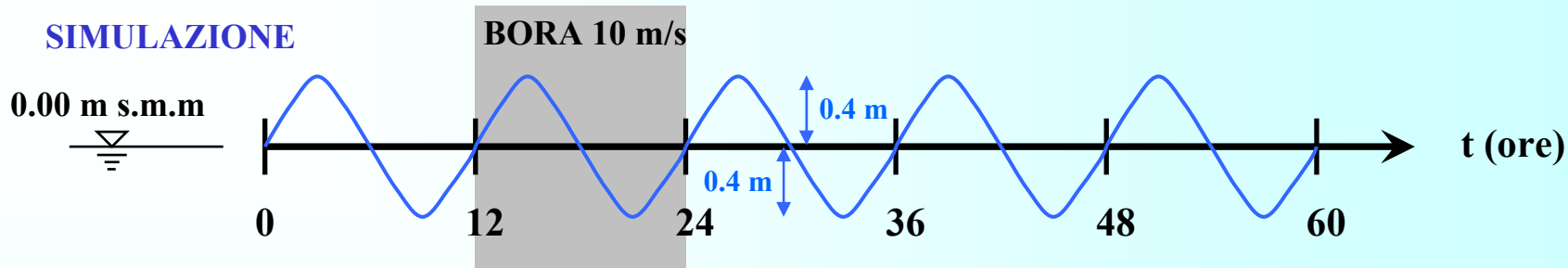
Distribuzione Spaziale della Concentrazione di Fango in Sospensione (p.p.m.)

Distribuzione Spaziale della Composizione granulometrica del fondale (% di Fango)



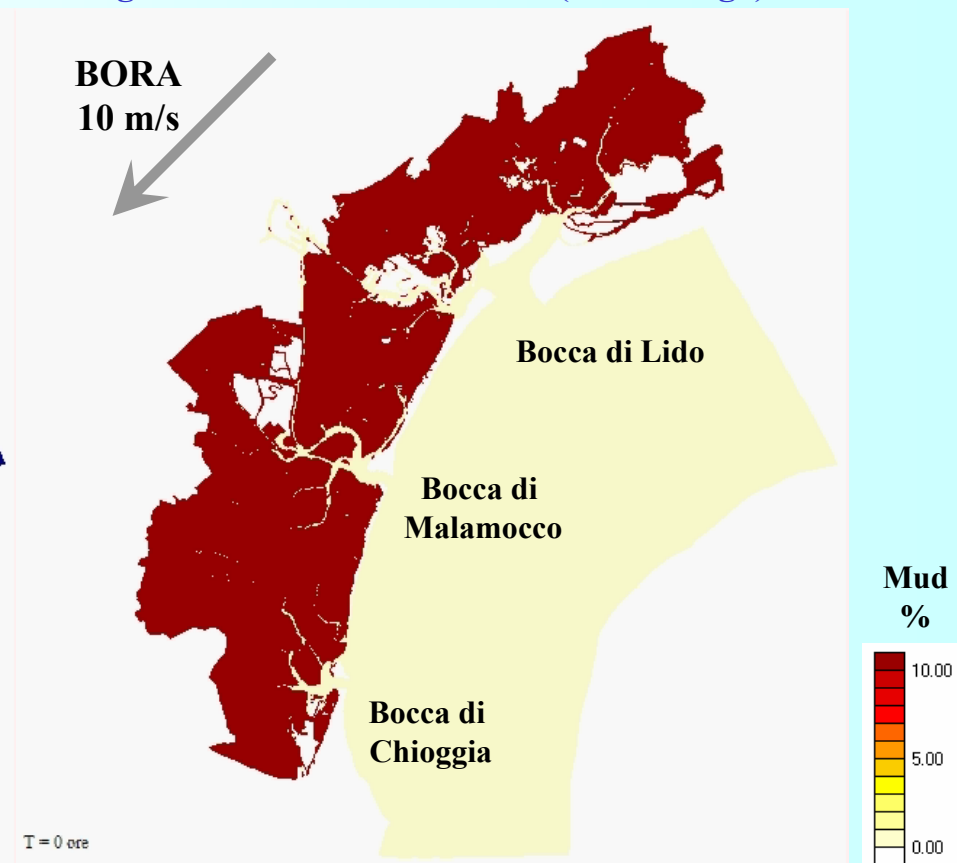
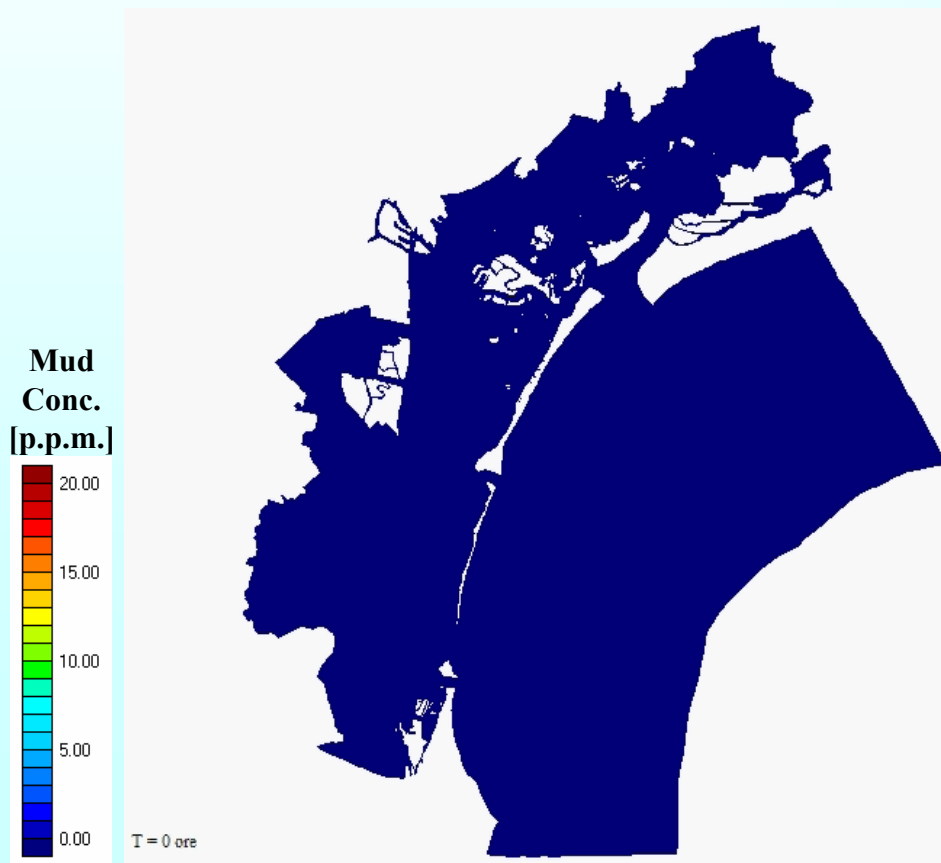
# Modello di TRASPORTO SOLIDO: Applicazione alla Laguna ATTUALE

SIMULAZIONE



Distribuzione Spaziale della Concentrazione di Fango in Sospensione (p.p.m.)

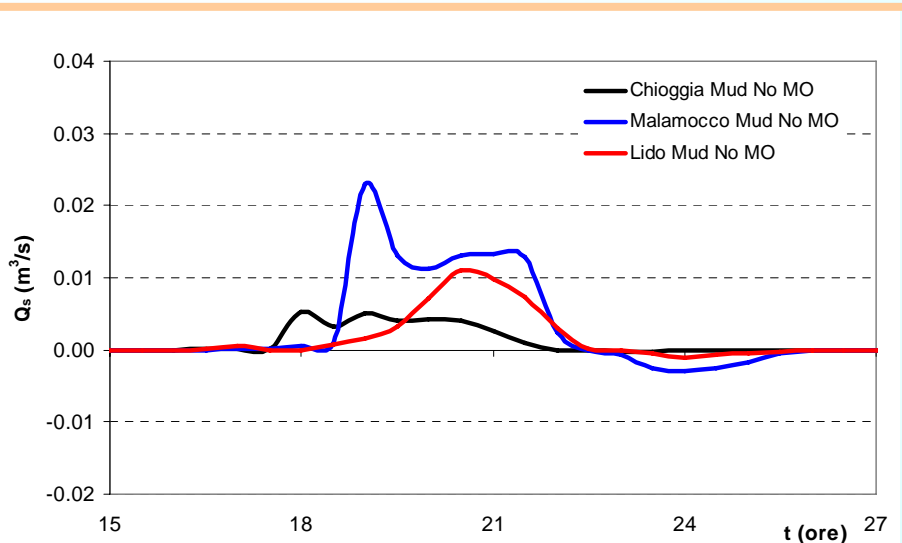
Distribuzione Spaziale della Composizione granulometrica del fondale (% di Fango)



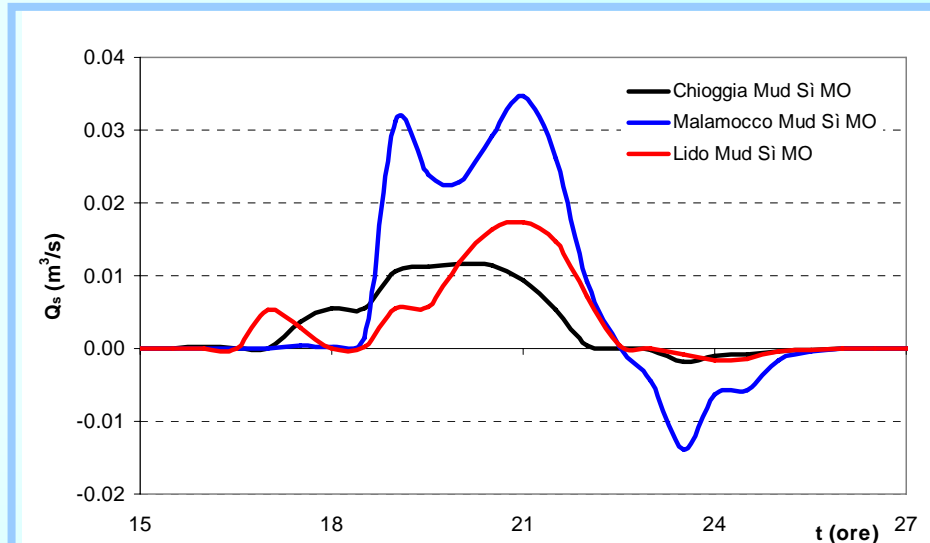
# Modello di TRASPORTO SOLIDO: Applicazione alla Laguna ATTUALE

## PERDITA NETTA di FANGO dovuta all'asimmetria idrodinamica delle bocche

Effetto della sola corrente di Marea



Effetto combinato di moto ondoso e correnti di marea



**PERDITA NETTA di “FANGO” in 12 ore:**

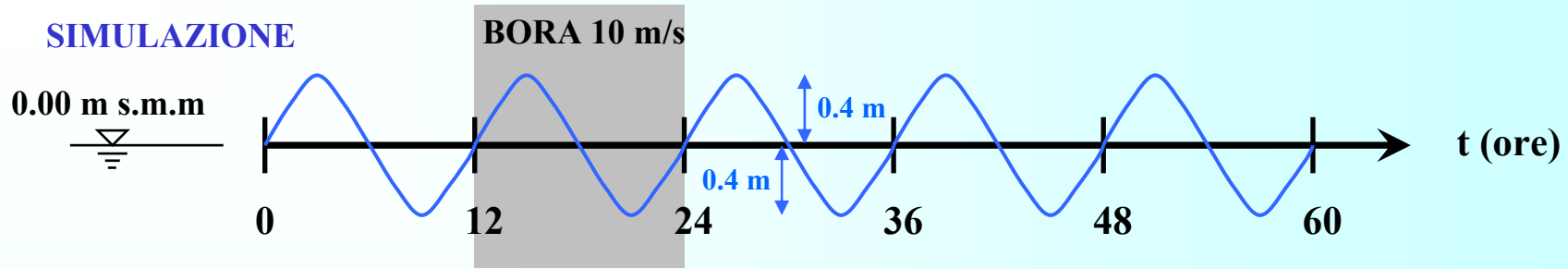
**Bocca di LIDO ~ 75 m<sup>3</sup>**  
**Bocca di MALAMOCCO ~ 140 m<sup>3</sup>**  
**Bocca di CHIOGGIA ~ 52 m<sup>3</sup>**

**Bocca di LIDO ~ 150 m<sup>3</sup>**  
**Bocca di MALAMOCCO ~ 265 m<sup>3</sup>**  
**Bocca di CHIOGGIA ~ 125 m<sup>3</sup>**

- ✓ La risospensione indotta dal moto ondoso incrementa considerevolmente la perdita di **SEDIMENTI FINI** attraverso le bocche della Laguna di Venezia.

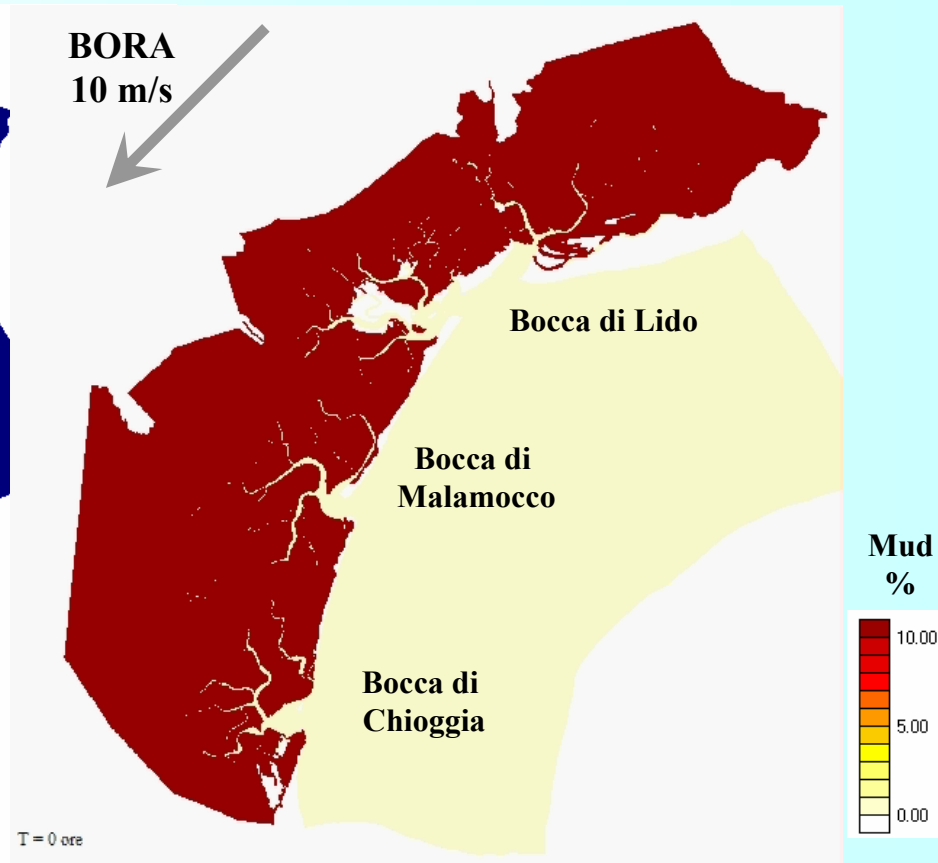
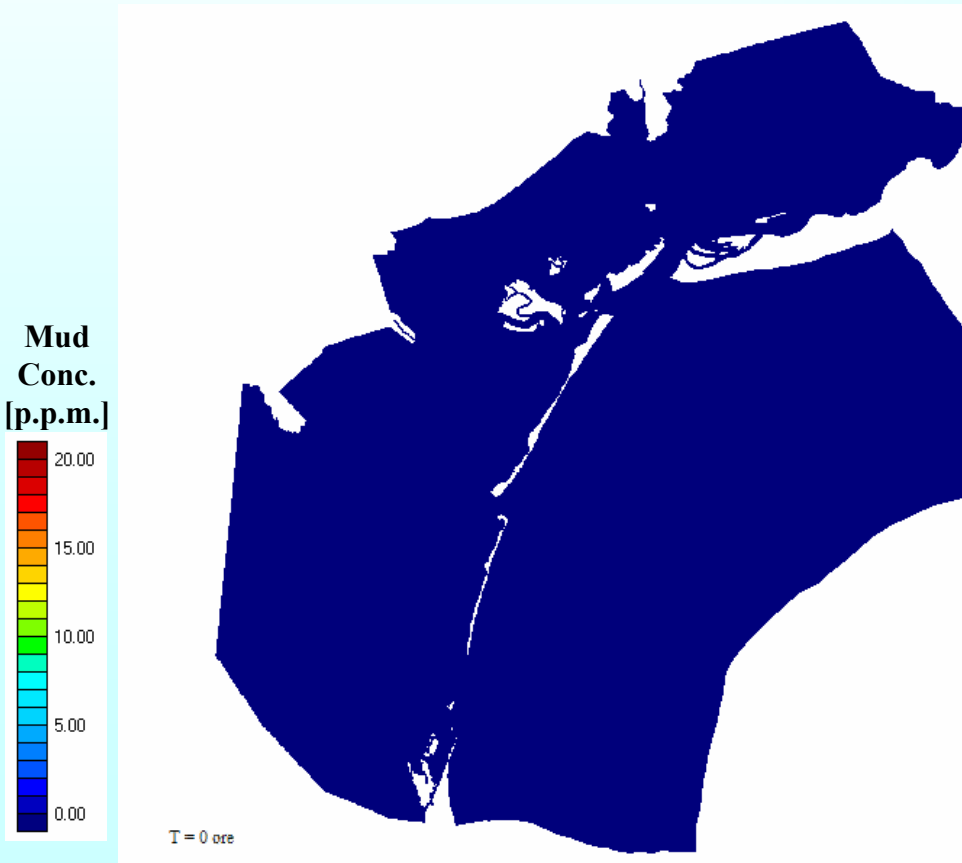
# Modello di TRASPORTO SOLIDO: Applicazione alla Laguna del Dénaix

SIMULAZIONE



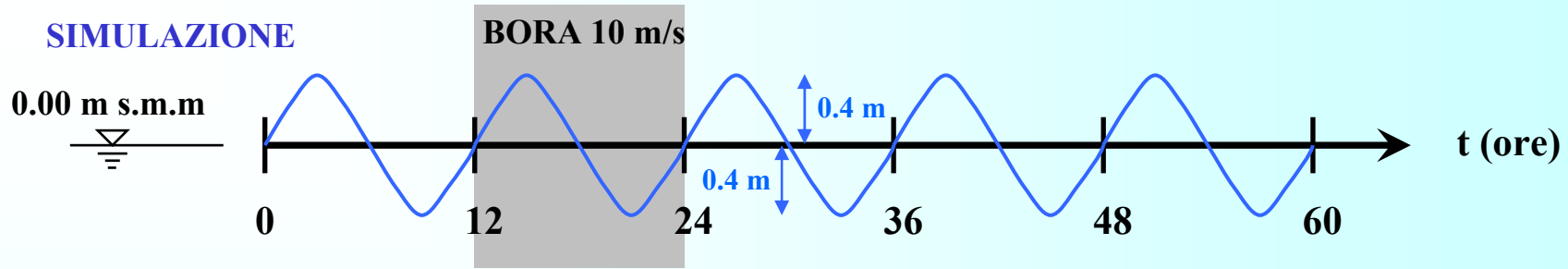
Distribuzione Spaziale della Concentrazione di Fango in Sospensione (p.p.m.)

Distribuzione Spaziale della Composizione granulometrica del fondale (% di Fango)



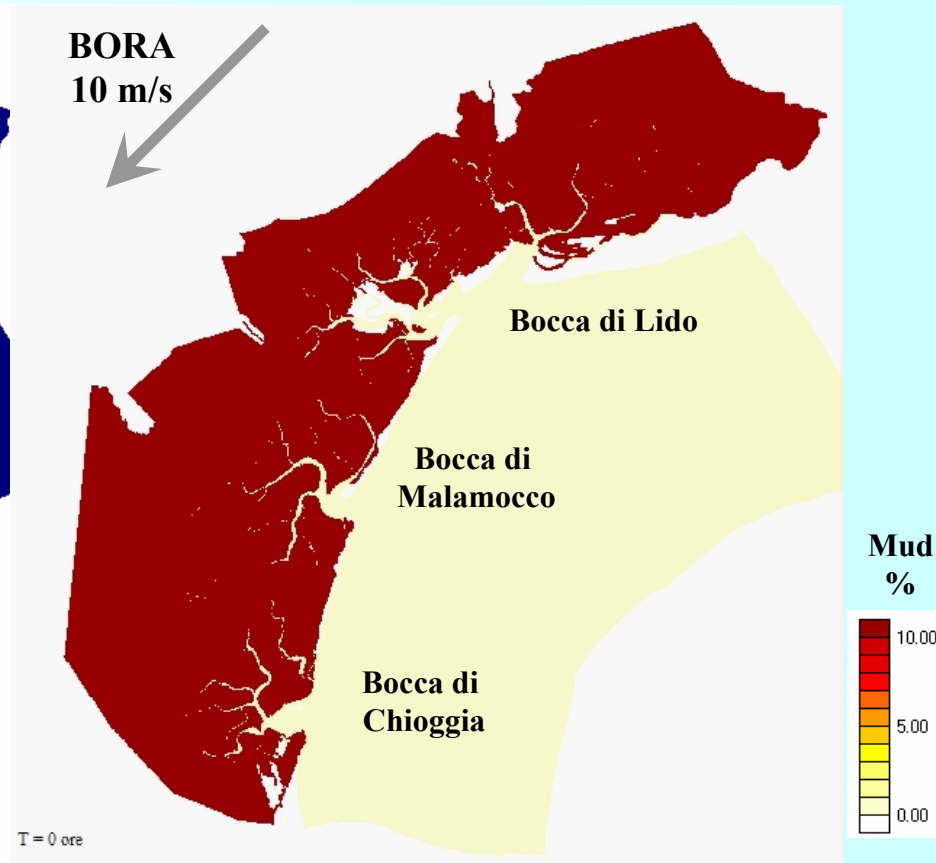
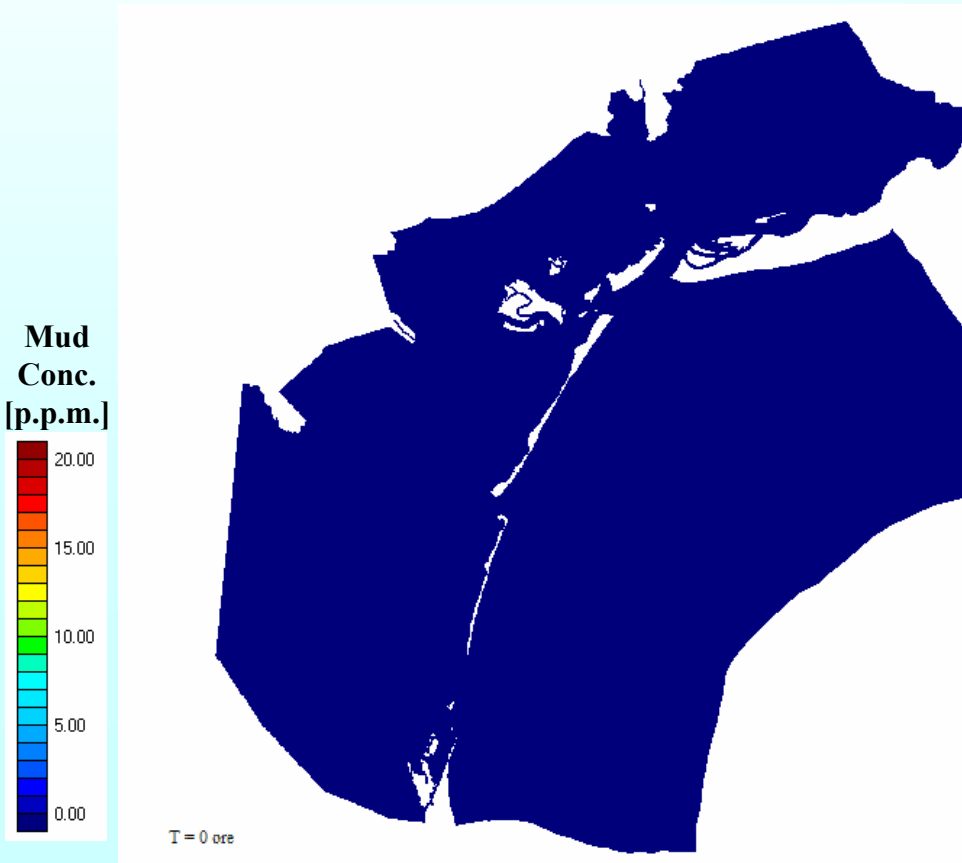
# Modello di TRASPORTO SOLIDO: Applicazione alla Laguna del Dénaix

SIMULAZIONE



Distribuzione Spaziale della Concentrazione di Fango in Sospensione (p.p.m.)

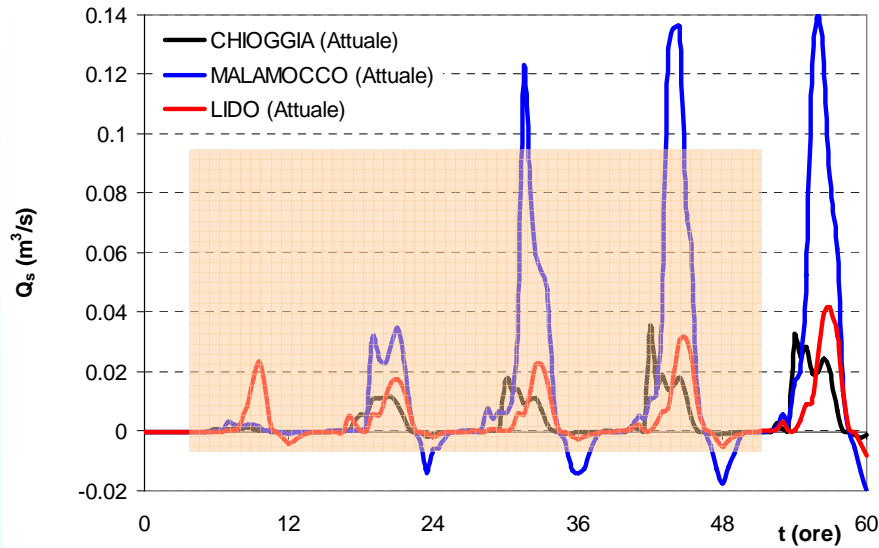
Distribuzione Spaziale della Composizione granulometrica del fondale (% di Fango)



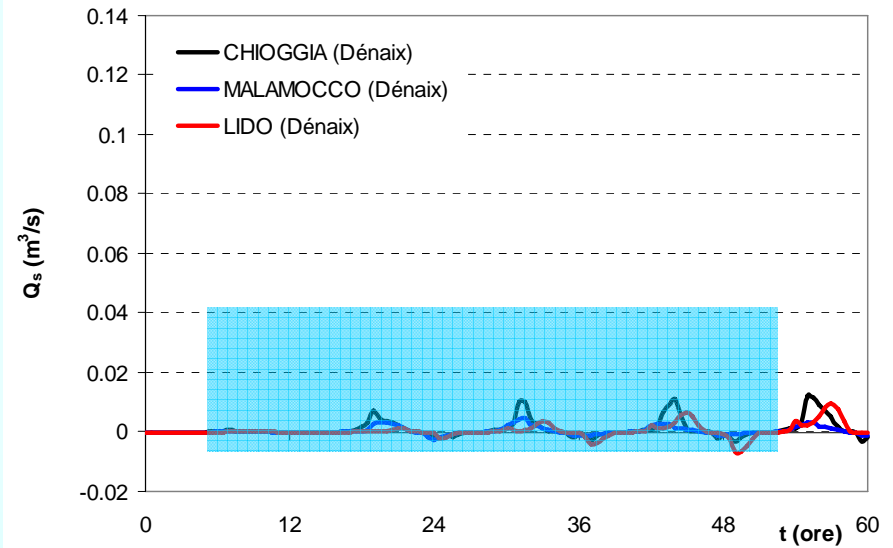
# Modello di TRASPORTO SOLIDO: confronto con la Laguna del DENAIX

**PERDITA NETTA di FANGO dovuta all'asimmetria idrodinamica delle bocche**

**Laguna ATTUALE**



**Laguna del Dénaix (1811)**



**PERDITA NETTA di “FANGO” in 48 ore (4 cicli):**

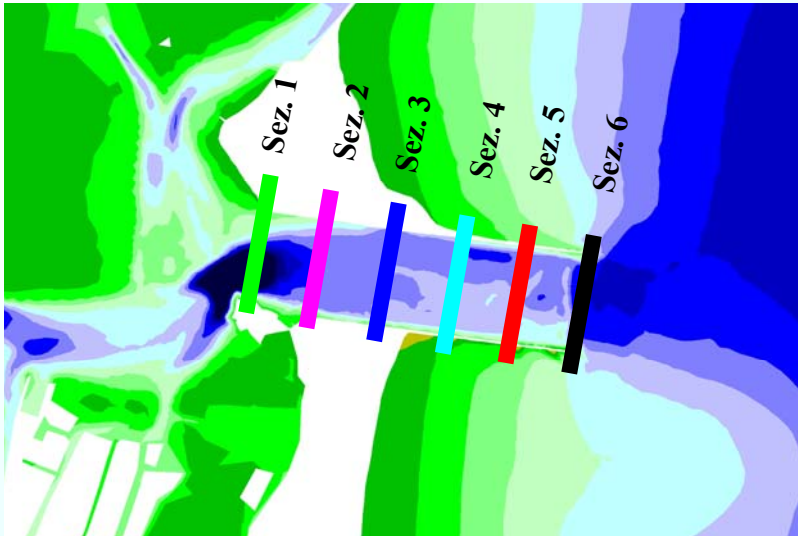
**Bocca di LIDO ~ 630 m<sup>3</sup>**  
**Bocca di MALAMOCCO ~ 2050 m<sup>3</sup>**  
**Bocca di CHIOGGIA ~ 530 m<sup>3</sup>**

**TOT ~ 3210 m<sup>3</sup>**

**Bocca di LIDO ~ 15 m<sup>3</sup>**  
**Bocca di MALAMOCCO ~ 61 m<sup>3</sup>**  
**Bocca di CHIOGGIA ~ 133 m<sup>3</sup>**

**TOT ~ 210 m<sup>3</sup>**

# Modello di TRASPORTO SOLIDO: sullo scambio di SABBIA alle bocche



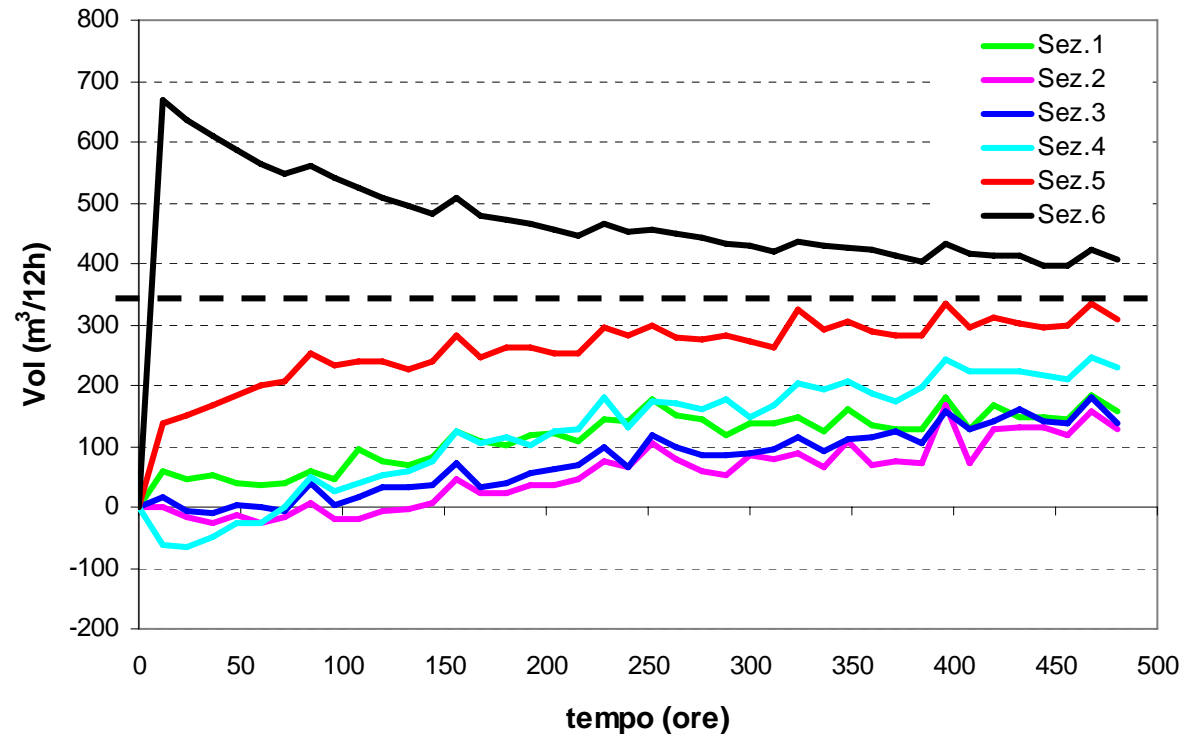
✓ La valutazione del volume netto di sabbia scambiata attraverso le bocche è complicata dalla constatazione che:

- La sabbia è mobilitata proprio in corrispondenza delle bocche di porto.
- Le bocche stesse non sono in equilibrio.

✓ Una stima dello scambio (perdita) netta di sabbia attraverso la bocca di CHIOGGIA è stata tentata portando a “regime” la bocca stessa:

**Scambio netto di sabbia alla  
Bocca di CHIOGGIA**

**~ 350 m<sup>3</sup> ogni 12 ore**





Programma di Ricerca 2004-2007  
Riunione annuale 2006  
LINEA di RICERCA 3.14

**GRAZIE PER LA VOSTRA ATTENZIONE**

Università degli studi di Padova  
Facoltà di Ingegneria  
Dipartimento IMAGE



# MODELLO IDRODINAMICO

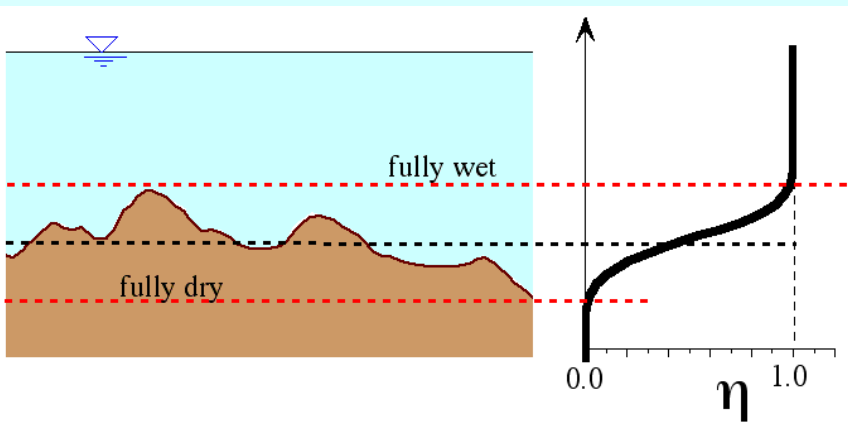
## Equazioni delle onde lunghe in acque basse:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{gY} \frac{dq_x}{dt} + \frac{q_x q_w}{K_s^2 H^{10/3}} - \eta \frac{\tau_{wx}}{\gamma Y} = 0 \\ \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{1}{gY} \frac{dq_y}{dt} + \frac{q_y q_w}{K_s^2 H^{10/3}} - \eta \frac{\tau_{wy}}{\gamma Y} = 0 \\ \eta \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \end{array} \right.$$

- $h$ : livello idrometrico;
- $Y$ : tirante d'acqua effettivo;
- $H$ : tirante d'acqua equivalente;
- $\mathbf{q}=(q_x, q_y)$ : velocità mediata in fase integrata sulla verticale;
- $K_s$ : coefficiente di scabrezza secondo Strickler;
- $\eta$ : porzione di area bagnata per unità di superficie;
- $\boldsymbol{\tau}_w=(\tau_{wx}, \tau_{wy})$ : sforzo di attrito sulla superficie libera dovuto al vento.

**Schema numerico:** Elementi Finiti seguendo la formulazione di Galerkin.

## Il problema della transizione asciutto-bagnato:

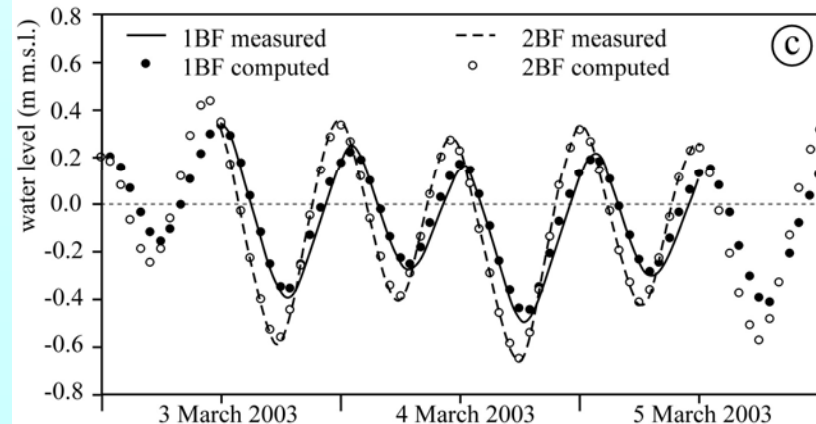
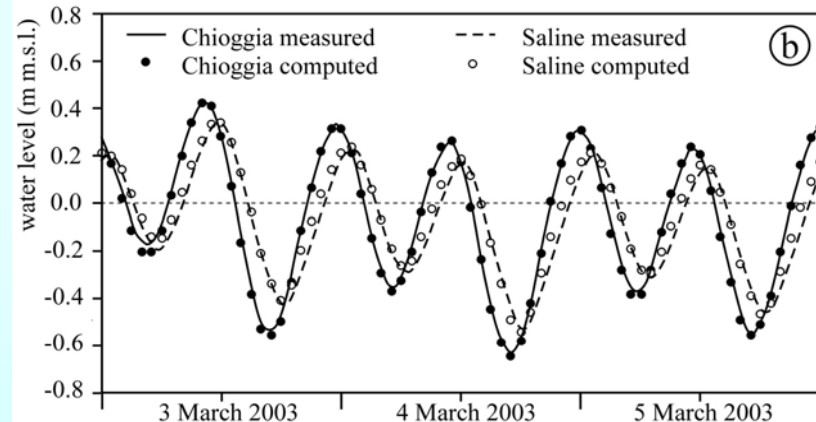
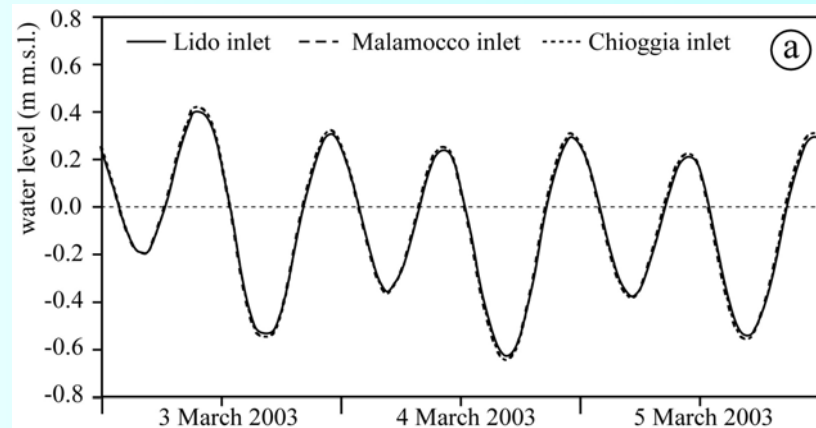
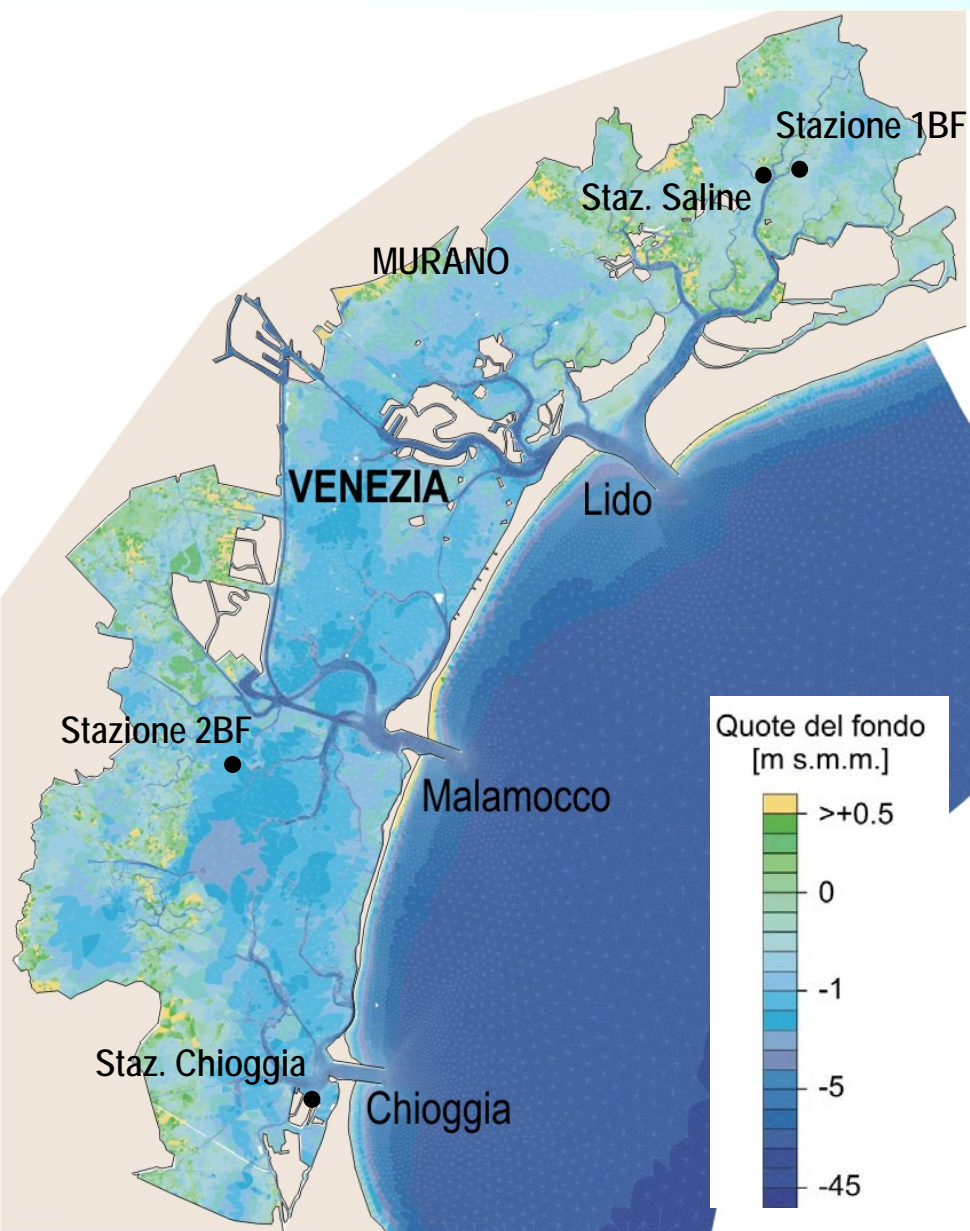


### Riferimenti:

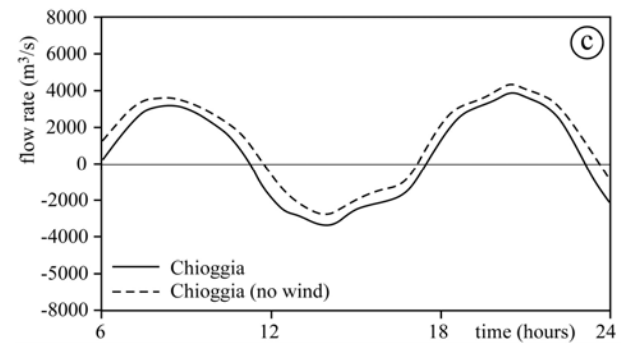
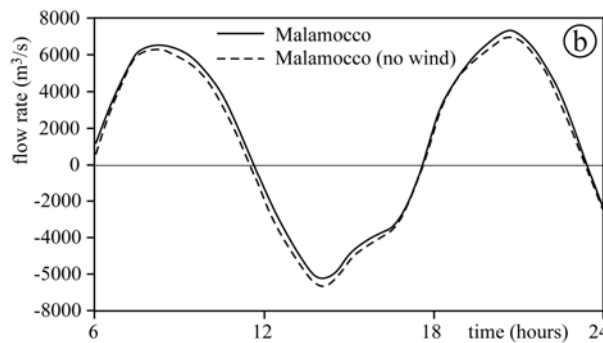
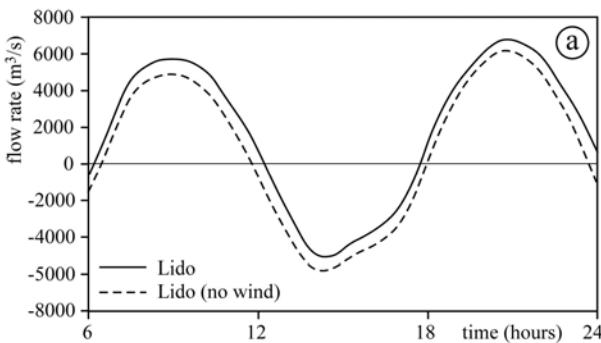
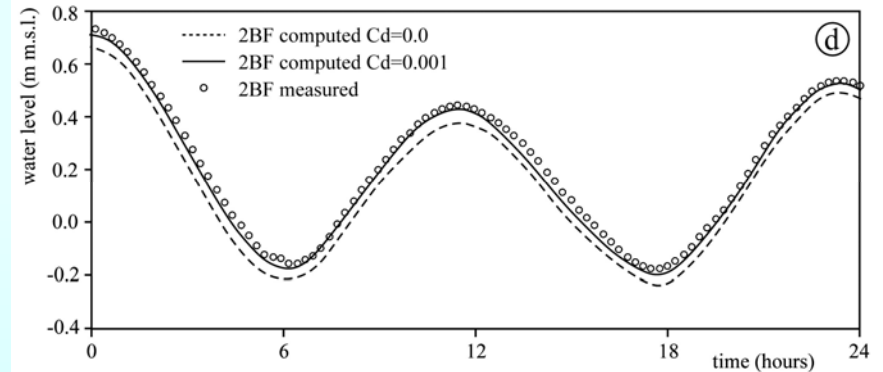
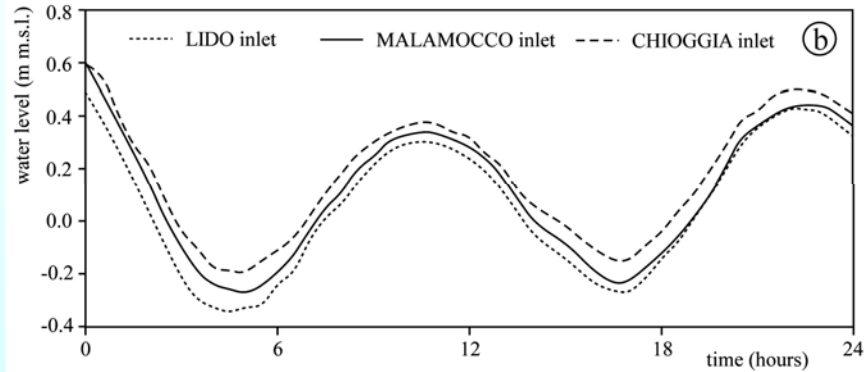
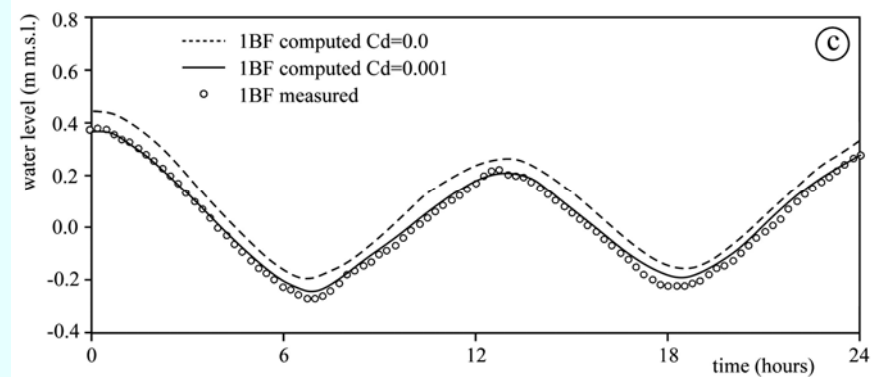
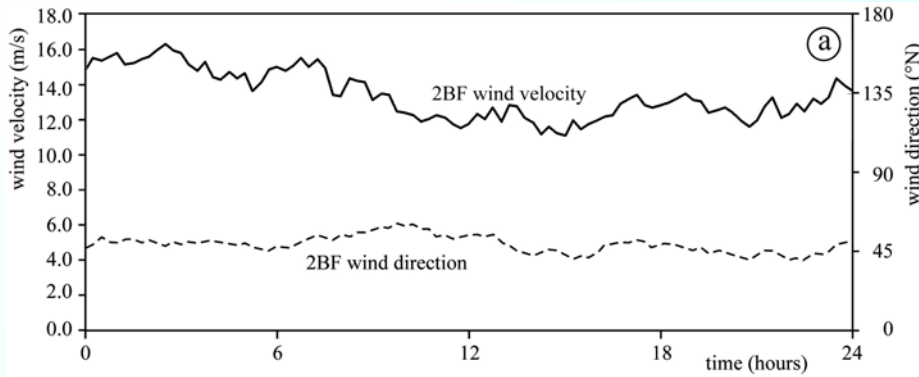
D'Alpaos L. and A. Defina, "Venice Lagoon hydrodynamics simulation by coupling 2D and 1D finite element models". Atti del VIII International Conference on Finite Elements in Fluids - New trends and applications. Barcellona 20-24 sett. , 917-926, 1993.

A. Defina, "Two dimensional shallow flow equation for partially dry areas", WRR 36 (11), 3251-3264, 2000

# Modello di IDRODINAMICO della Laguna di Venezia: **RISULTATI**



# Modello di IDRODINAMICO della Laguna di Venezia: **RISULTATI**



# MODELLO DI MOTO ONDOSO

- ✓ L'equazione di conservazione dell' “azione d'onda” (N):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(N\mathbf{c}_{gx})}{\partial x} + \frac{\partial(N\mathbf{c}_{gy})}{\partial y} + \cancel{\frac{\partial(N\mathbf{c}_g)}{\partial \vartheta}} + \cancel{\frac{\partial(N\mathbf{c}_\sigma)}{\partial \sigma}} = \frac{S}{\sigma}$$

- ✓ Ipotesi semplificative introdotte:

- **onda monocromatica**

relazione di dispersione  $\sigma^2 = g k \tanh(kY)$  con  $\sigma = 2\pi/T$ ,  $k = 2\pi/\lambda$   
con  $T = \text{cost}$  (T.L.) fornisce un legame biunivoco  $k \Leftrightarrow Y$

- **direzione del moto ondoso coincidente con quella del vento**

diriz. moto ondoso ( $\vartheta$ )  $\equiv$  diriz. vento ( $\vartheta_w$ ) [adattamento istantaneo]

- ✓ Termini Sorgente (S):

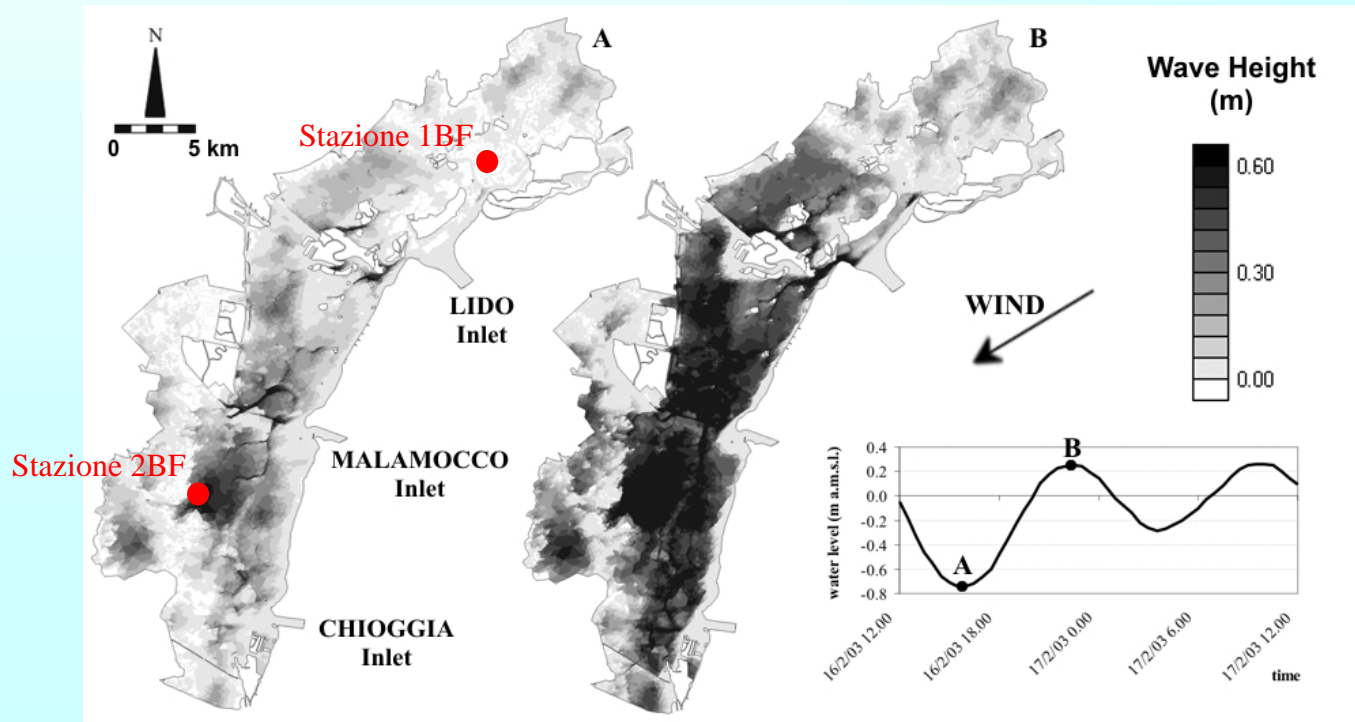
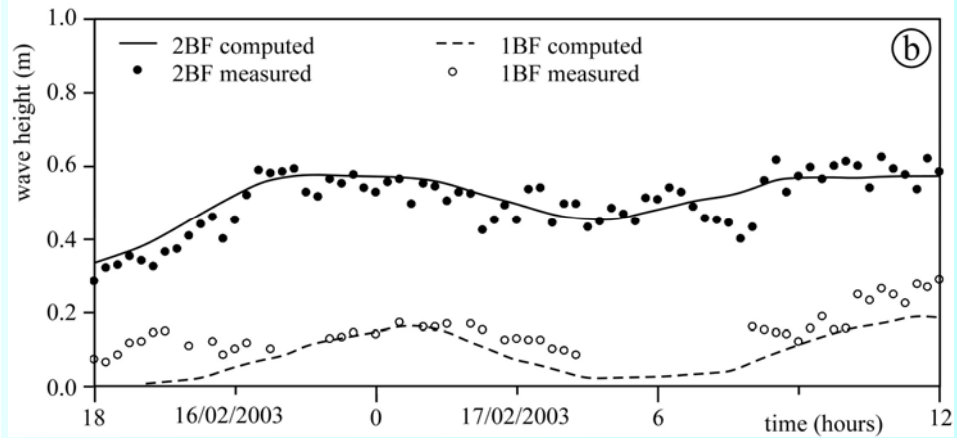
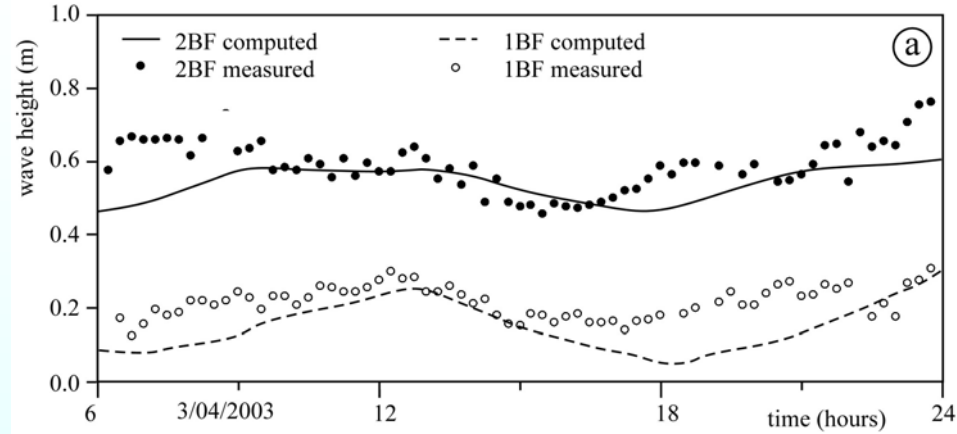
- **Generazione dovuta al vento** [Phillips (1957); Barnett (1968)]
- **Attrito al fondo** [Collins (1972)]
- **White-capping** [Komen et al. (1984)]
- **Frangimento**  $\left\{ \begin{array}{l} \text{“di elemento” [Battjes \& Janssen (1978)]} \\ \text{“di frontiera” (riduzione del flusso convettivo)} \end{array} \right.$

**Schema Numerico:** Volumi Finiti Upwind

# Modello di MOTO ONDOSO della Laguna di Venezia: **RISULTATI**

3 Aprile 2003:  $\theta_{\text{wind}} \cong 45^\circ\text{N}$ ;  $U_{\text{wind}} \cong 12\div 16 \text{ m/s}$

16-17 Febbraio 2003:  $\theta_{\text{wind}} \cong 60^\circ\text{N}$ ;  $U_{\text{wind}} \cong 10\div 12 \text{ m/s}$



# LAGUNA di VENEZIA: valori dello Sforzo di Attrito al Fondo

16-17 Febbraio 2003 ( $\theta_{\text{wind}} \cong 60^\circ\text{N}$ ;  $U_{\text{wind}} \cong 10\div 12\text{ m/s}$ ): Valutazione dello sforzo di attrito al fondo

