

DINAMICA DELLA TEMPERATURA DELL'ACQUA IN AMBIENTI A MAREA POCO PROFONDI: USO COMBINATO DI IMMAGINI SATELLITARI, MISURE IN-SITU E RISULTATI NUMERICI

Mattia Pivato ^{1*}, Luca Carniello ¹, Daniele Pietro Viero ¹, Andrea Defina ¹ & Sonia Silvestri ²

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Padova (Padova)

(2) Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali, Università di Bologna (Bologna)

*email: mattia.pivato.1@dicea.unipd.it

ASPETTI CHIAVE

- Caratterizzazione della dinamica della temperatura in ambienti costieri poco profondi.
- Utilizzo combinato di misure in-situ, immagini satellitari e risultati numerici.
- Sviluppo e test di un modello bidimensionale per descrivere la dinamica della temperatura.

1. INTRODUZIONE

L'evoluzione degli ecosistemi costieri è fortemente influenzata dalla temperatura dell'acqua, fattore cruciale in numerosi processi ecologici e biologici. Dalla temperatura dell'acqua dipende la solubilità dell'ossigeno e di conseguenza la concentrazione di ossigeno disciolto, la quale diminuisce al crescere della temperatura (Anthony *et al.*, 2009; Joos *et al.*, 2003). La disponibilità di ossigeno in soluzione e la temperatura, associate ad altri fattori come la salinità e la disponibilità di nutrienti, controllano la proliferazione di micro-alghe e la crescita della vegetazione nei sistemi acquatici (Carr *et al.*, 2016; Pesce *et al.*, 2018), influenzando di conseguenza la torbidità, la qualità dell'acqua e l'evoluzione morfodinamica del bacino idrico. Il ruolo della temperatura nelle dinamiche ecosistemiche risulta di particolare importanza in bacini semi-chiusi e poco profondi come la laguna di Venezia, le cui aree interne sono caratterizzate da scarso ricambio idrico (Viero and Defina, 2016). Il monitoraggio della temperatura dell'acqua, spazialmente distribuito e continuo nel tempo, risulta quindi necessario al fine di pianificare soluzioni adeguate per preservare e migliorare lo stato eco-sistemico dei bacini lagunari.

Nel presente contributo si presenta un modello numerico in grado di descrivere la dinamica spazio-temporale della temperatura in bacini idrici poco profondi, esaminando come l'utilizzo combinato di dati rilevati da satellite, misure in-situ e risultati numerici possa fornire una descrizione completa ed efficace dell'evoluzione termica di un bacino idrico. In particolare, l'analisi si concentra su uno specifico caso studio, la laguna di Venezia.

2. MODELLO NUMERICO

Al fine di descrivere la dinamica spazio-temporale della temperatura dell'acqua in un bacino lagunare, un modulo della temperatura è stato implementato in un modello idro-morfodinamico esistente ed ampiamente testato in letteratura. Il modello idro-morfodinamico è costituito di ulteriori 4 moduli che permettono di rappresentare il campo idrodinamico, la generazione e propagazione delle onde da vento, il trasporto solido e l'evoluzione del fondo in bacini poco profondi (Carniello *et al.*, 2011, 2012, 2016).

Il modulo della temperatura consente di risolvere l'equazione di avvezione e diffusione del calore:

$$\frac{\partial T_w Y}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{q} T_w) - \nabla \cdot (\mathbf{YD} \nabla T_w) = \frac{H_{NET}}{\rho c_P} \quad (1)$$

nella quale $T_w [^{\circ}C]$ è la temperatura dell'acqua, assunta uniforme su tutta la colonna liquida, $\mathbf{q} [m^3 s^{-1} m^{-1}]$ è la portata liquida per unità di larghezza, $Y [m]$ è l'altezza della colonna liquida equivalente (Defina, 2000), \mathbf{D} è il tensore di diffusione, $H_{NET} [W m^{-2}]$ è il flusso verticale netto di energia, $\rho [kg m^{-3}]$ e $c_P [J kg^{-1}]$ sono la

densità e il calore specifico dell'acqua. Il modello idro-morfodinamico fornisce le portate liquide necessarie per calcolo dei flussi avvertivi di calore. Il coefficiente di dispersione orizzontale è assunto pari alla viscosità cinematica turbolenta calcolata dal modulo idrodinamico.

Il flusso netto H_{NET} è dato dalla somma dei flussi di energia all'interfaccia acqua-atmosfera, sintetizzati in Tab. 1. In prima approssimazione, lo scambio di calore tra colonna d'acqua e fondale è stato trascurato poiché, dall'analisi di misure in-situ, è emerso che il suo contributo al bilancio di energia della colonna d'acqua risulta limitato se confrontato con quello degli altri flussi di energia (Pivato et al., 2018).

| Componente | Formulazione | Riferimento bibliografico |
|----------------------------|--|---------------------------|
| Radiazione Short Wave | $H_{sho} = (1-alb) R_{sun} [1-exp(-\eta Y)]$ | Denman et al., 1973 |
| Radiazione Long-Wave | $H_{lon} = T_{air}^4(0.653+0.00535 e_{vair}) - \epsilon\sigma T_w^4$ | Bignami et al., 1995 |
| Flusso di Calore Sensibile | $H_{sen} = C_{sen} c_{Pair} \rho_{air} V_{wind} (T_{air}-T_w)$ | Fairall et al., 2003 |
| Flusso di Calore Latente | $H_{lat} = C_{lat} L_v \rho_{air} V_{wind} (q_s-q_{air})$ | Fairall et al., 2003 |

Tabella 1. Flussi di energia all'interfaccia aria-acqua.

3. MISURE IN-SITU E IMMAGINI SATELLITARI

Misure in-situ e immagini satellitari sono state utilizzate al fine di analizzare la dinamica della temperatura sull'intero bacino e di testare l'efficacia del modello nel riprodurre il processo.

I dati necessari al modello come condizioni al contorno sono stati forniti dalla rete mareografica della laguna di Venezia, gestita dall'*Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – ISPRA* (Fig. 1a, stazioni M), e consistono in: livello, temperatura dell'acqua e pressione atmosferica misurati presso la *Piattaforma CNR* (M1); radiazione solare; temperatura dell'aria, umidità relativa, misurati presso *Lido Meteo* (M2); velocità e direzione del vento misurati presso *Chioggia Diga Sud* (M3).

Le serie temporali di misure di temperatura dell'acqua fornite dalla rete di 10 sonde multiparametriche, gestite dal *Provveditorato per le Opere Pubbliche del Triveneto* (Fig. 1a, stazioni VE) sono invece utilizzate per valutare la capacità del modello di seguire, localmente, la dinamica del processo nel tempo.

Per inizializzare il sistema e testare la capacità del modello di riprodurre correttamente la distribuzione spaziale della temperatura dell'acqua, è stata scelta una coppia di immagini satellitari soddisfacente i seguenti requisiti: *i*) immagini acquisite in un periodo in cui siano disponibili sia le condizioni al contorno che le misure di temperatura dell'acqua presso tutte le 10 sonde; *ii*) condizioni meteo buone, tali da limitare l'interferenza di nuvole e foschia; *iii*) disponibilità di almeno una coppia di immagini acquisite a distanza di massimo 10 giorni. Le immagini utilizzate, acquisite rispettivamente il 2 ed il 9 maggio 2008, sono disponibili gratuitamente nel database online dello USGS Earth Explorer.

4. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Il modello è stato testato effettuando una simulazione della durata di una settimana, con istante iniziale e finale coincidenti rispettivamente con l'istante di acquisizione della prima e della seconda immagine satellitare, utilizzate rispettivamente per inizializzare la distribuzione della temperatura e verificare spazialmente l'efficacia del modello nel rappresentare la dinamica della temperatura.

Il confronto tra risultati numerici e misure in-situ (Fig. 1b) dimostra che il modello è in grado di seguire in modo soddisfacente l'evoluzione della temperatura dell'acqua nel tempo. In particolare, la dinamica della temperatura è ben riprodotta sia nelle aree più interne della laguna (Stazione VE-2), dove il processo è principalmente guidato dallo scambio verticale di energia all'interfaccia acqua-atmosfera, che in prossimità delle bocche di porto (Stazione VE-3), dove il trasporto orizzontale di calore dovuto alle correnti di marea gioca un ruolo fondamentale. Nelle aree interne si osserva infatti una modulazione diurna della temperatura, analoga alla modulazione della cumulata dell'energia netta scambiata all'interfaccia acqua-atmosfera ($E = \int_0^t H_{NET} d\tau$); in prossimità delle bocche di porto, invece, la temperatura dell'acqua è caratterizzata da una

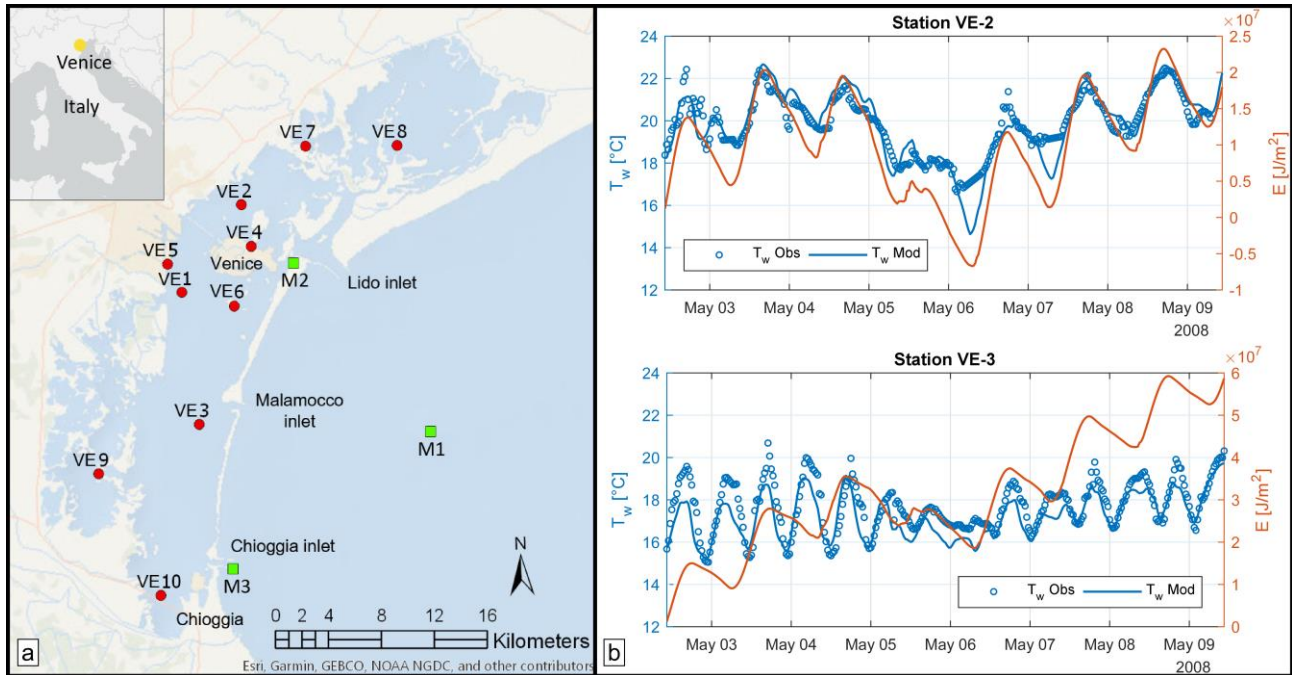


Figura 1. (a) mappa delle stazioni di misura nella Laguna di Venezia; (b) confronto tra risultati del modello e dati di temperatura misurati in due stazioni.

modulazione semi-diurna, chiaramente influenzata dall'oscillazione di marea e dal conseguente flusso di acqua più fredda proveniente dal mare in fase di flusso e dalle aree interne del bacino, più calde, in fase di riflusso. Il confronto con i dati misurati dimostra la capacità del modello di descrivere in modo soddisfacente i flussi di energia e la conseguente evoluzione temporale della temperatura in presenza di eventi meteo di un certo rilievo: il netto calo della temperatura dell'acqua evidenziato dalle misure il 5 maggio, dovuto al passaggio di una perturbazione sulla laguna, viene infatti correttamente descritto dai risultati numerici.

L'affidabilità del modello è confermata dal confronto tra la distribuzione spaziale della temperatura rilevata da satellite e calcolata dal modello al termine della simulazione della durata di una settimana (Fig. 2). La differenza tra temperatura modellata e osservata ($\Delta T_w = T_w^{Mod} - T_w^{Obs}$) è inferiore a $\pm 1^\circ C$ sul 65% della superficie della laguna, e superiore a $\pm 2^\circ C$ solo sul 17% della laguna. Il valore medio di $|\Delta T_w|$, opportunamente pesato sull'area degli elementi della griglia numerica, è pari $1.27 \pm 2.15^\circ C$. In particolare, il modello sembra sottostimare la temperatura di più di $1^\circ C$ sul 25% della superficie bagnata della laguna. Tuttavia, in molte aree la sottostima osservata può essere ragionevolmente attribuita a informazioni erranee fornite dall'immagine satellitare piuttosto che a limiti del modello. Le zone in cui si osservano maggiori problemi di sottostima sono infatti collocate in vicinanza dei bordi del dominio di calcolo o di aree asciutte (e.g. barene) nell'istante di acquisizione dell'immagine satellitare, dove la temperatura rilevata dal satellite può essere influenzata dalla temperatura delle zone emerse, più calde rispetto all'acqua. Il modello stima, in particolare, una temperatura inferiore rispetto alla temperatura rilevata da satellite in corrispondenza dell'area antistante il polo industriale di Marghera. In questo caso, la sottostima è spiegata dal fatto che, in assenza di dati, le emissioni termiche dovute allo sfruttamento industriale della risorsa idrica non sono considerate nella simulazione effettuata. Il riscaldamento dell'area antistante il polo industriale dovuta a tali emissioni non può dunque essere colta dal modello. Questa osservazione evidenzia come l'utilizzo combinato di risultati numerici di misure in-situ o da remoto permetta anche di evidenziare e/o stimare i possibili effetti termici dovuti agli usi antropici della risorsa idrica.

5. CONCLUSIONI

Il confronto tra risultati numerici e misure, sia puntuali e continue nel tempo che istantanee e spazialmente distribuite, mostrano come il modello sviluppato nel presente lavoro descriva in modo efficace la dinamica della temperatura dell'acqua in ambienti costieri caratterizzati da fondali poco profondi.

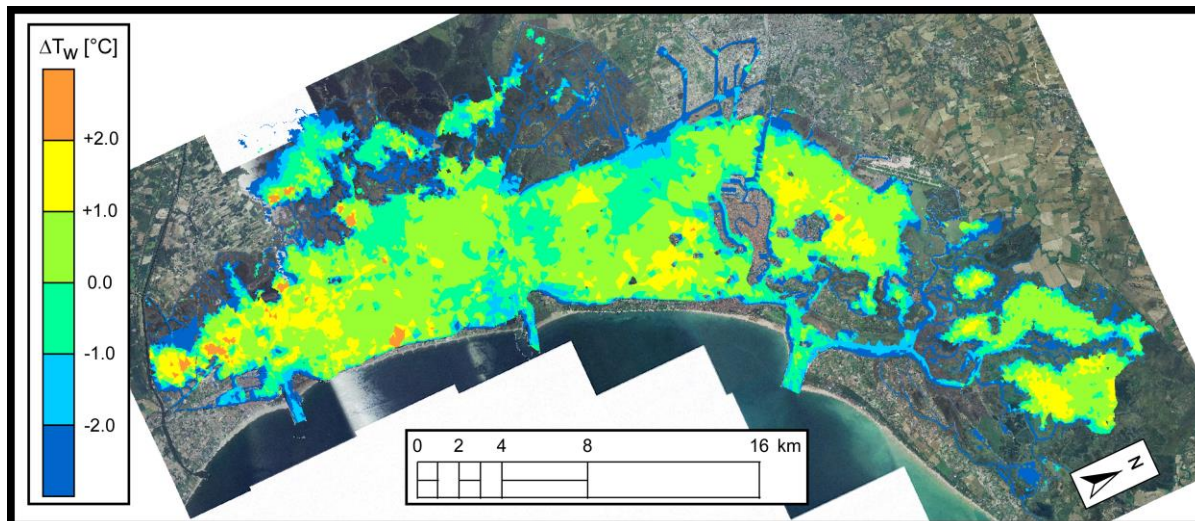


Figura 2. Distribuzione spaziale delle differenze (ΔT_w) tra temperatura modellata e rilevata da satellite il 9 maggio 2018, 10:30 a.m.

L'utilizzo accoppiato di misure in-situ, immagini satellitari e risultati numerici rappresenta uno strumento efficace, funzionale al monitoraggio e alla pianificazione gestionale di tali ambienti. La possibilità di descrivere la dinamica della temperatura dell'acqua rappresenta un punto di partenza per lo sviluppo di modelli numerici capaci di descrivere i processi ecologici e biologici che influenzano l'evoluzione degli ecosistemi lagunari, tali da fornire una caratterizzazione il più possibile completa di tali ambienti.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Anthony, A., Atwood, J., August, P., Byron, C., Cobb, S., Foster, C., Fry, C., Gold, A., Hagos, K., Heffner, L., Kellogg, D.Q., Lellis-Dibble, K., Opaluch, J.J., Oviatt, C., Pfeiffer-Herbert, A., Rohr, N., Smith, L., Smythe, T., Swift, J. & Vinhateiro, N. Coastal lagoons and climate change: Ecological and social ramifications in U.S. Atlantic and Gulf coast ecosystems. *Ecology and Society*, 2009, 14.
- Bignami, F., Marullo, S., Santoleri, R. & Schiano, M.E. Longwave radiation budget in the Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100, 2501.
- Carniello, L., D'Alpaos, A. & Defina, A. Modeling wind waves and tidal flows in shallow micro-tidal basins. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 2011, 92, pp. 263-276.
- Carniello, L., Defina, A. & D'Alpaos, L. Modeling sand-mud transport induced by tidal currents and wind waves in shallow microtidal basins: Application to the Venice Lagoon (Italy). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 2012, pp. 102-115.
- Carniello, L., D'Alpaos, A., Botter, G. & Rinaldo, A. Statistical characterization of spatio-temporal sediment dynamics in the Venice lagoon. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2016, 121 (5), 1049-1064, doi:10.1002/2015JF003793.
- Carr, J.A., D'Odorico, P., McGlathery, K.J. & Wiberg, P.L. Spatially explicit feedbacks between seagrass meadow structure, sediment and light: Habitat suitability for seagrass growth. *Advances in Water Resources* 2016, 93, pp. 315-325.
- Defina, A. Two-dimensional shallow flow equations for partially dry areas. *Water Resource Research*. 2000, 36, pp. 3251-3264.
- Denman, K.L. & Miyake, M. *Upper Layer Modification at Ocean Station Papa: Observations and Simulation*, 1973.
- Fairall, C.W., Bradley, E.F., Hare, J.E. & Grachev, A.A.; Edson, J.B. Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm. *Journal of Climate* 2003, 16, pp. 571-591.
- Joos, F., Platner, G.K., Stocker, T.F., Kortzinger, A. & Wallace, D.W. Trends in marine dissolved oxygen: Implications for ocean circulation changes and the carbon budget. *Eos* 2003, 84, pp. 84-86.
- Pesce, M., Critto, A., Torresan, S., Giubilato, E., Santini, M., Zirino, A., Ouyang, W. & Marcomini, A. Modelling climate change impacts on nutrients and primary production in coastal waters. *Science of the Total Environment* 2018, 628-629, pp. 919-937.
- Pivato, M., Carniello, L., Gardner, J., Silvestri, S. & Marani, M. Water and sediment temperature dynamics in shallow tidal environments: The role of the heat flux at the sediment-water interface. *Advances in Water Resources* 2018, 113, pp. 126-140.
- Viero, D.P. & Defina, A. Water age, exposure time, and local flushing time in semi-enclosed, tidal basins with negligible freshwater inflow. *Journal of Marine Systems* 2016, 156, pp. 16-29.