



Il contributo delle osservazioni satellitari degli oceani al monitoraggio del clima

Le osservazioni dallo spazio sono una componente di rilievo del sistema di sorveglianza climatica e di previsione a varie scale temporali, da quelle sub-diurne a quelle multidecadali. L'analisi dei dati ottenuti può contribuire fattivamente alla definizione del clima attuale ed a quantificare le variazioni più recenti, in particolare attraverso la misura di Temperatura Superficiale del Mare (SST) intesa come indicatore principale, osservabile dallo spazio, dei cambiamenti climatici in atto.

DOI 10.12910/EAI2021-094

di Salvatore Marullo - Laboratorio di modellistica climatica e impatti e Rosalia Santoleri- Istituto di Scienze Marine, ISMAR-CNR

I dati provenienti dalle osservazioni sperimentali e dalle simulazioni prodotte dai modelli numerici rappresentano, insieme alla nostra cultura scientifica, lo strumento principale per il controllo e la compren-

sione del sistema climatico terrestre. In questo contesto, **le osservazioni dallo spazio rappresentano una componente non secondaria del sistema di sorveglianza climatica e di previsione a varie scale temporali che van-**

no da quelle sub-diurne fino a quelle multidecadali.

Recentemente, le serie continuative di dati satellitari di alcune variabili climatiche essenziali (EVC, <https://gcos.wmo.int/en/essential-clima-e-variables/table>)

sono diventate abbastanza lunghe da soddisfare i criteri previsti dalla World Meteorological Organization (WMO) per la determinazione di medie climatiche. In WMO, 2017 si legge infatti che, come definizione di “Climatological standard normals”, vada usata la media di dati calcolata su periodi consecutivi di 30 anni. Accettando alla lettera la definizione proposta dal WMO per i dati satellitari, solo le serie temporali di temperatura superficiale del mare, o più in generale della superficie terrestre, soddisfano questo criterio ricoprendo con continuità e su scala globale, un periodo che va dal 1981 ad oggi. Altre variabili, come, ad esempio, quelle ricavate da misure del colore del mare o livello del mare, sono comunque abbastanza vicine ad avere 30 anni di dati avendo registrato rispettivamente 23 di acquisizione, dalla missione SeaWiFS fino alle missioni Sentinel, e 29 anni di acquisizioni iniziando dagli altimetri TOPEX/Poseidon fino al “dual-frequency SAR altimeter” tuttora operante su Sentinel-3.

La misura di Temperatura Superficiale del Mare (SST)

In questa breve nota ci focalizzeremo quindi sulle osservazioni satellitari degli oceani con particolare riferimento alla misura di Temperatura Superficiale del Mare (SST) intesa come indicatore principale, osservabile dallo spazio, dei cambiamenti climatici in atto. La SST rappresenta infatti la più lunga e continuativa serie temporale di dati rilevati, ricoprendo un intervallo temporale che va dal 1981 a oggi; quasi 40 anni di ininterrotte misurazioni. Questi dati sono disponibili presso il Climate Data Store (CDS) gestito dall'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Altri dati satellitari sono disponibili presso i sistemi di archiviazione e disseminazione di altre entità governative

demandate a servizi operativi per la meteorologia e l'oceanografia. Tra questi va, menzionato il **Copernicus Marine Service (CMEMS)**, (<https://marine.copernicus.eu/>), dedicato alla distribuzione di dati e alla fornitura di servizi marini gratuiti al fine di consentire l'attuazione delle politiche per il mare e per sostenere la crescita blu e l'innovazione scientifica (Schuckmann et al., 2021).

L'insieme di questi servizi operativi, la crescente disponibilità di potenti sistemi calcolo individuali e le immense capacità di “data storage”, inimmaginabili fino a pochi anni fa, hanno reso realisticamente possibile l'analisi delle lunghe serie temporali di dati satellitari ad altissima risoluzione spaziale e temporale fornendo, di fatto, una visione d'insieme dello stato attuale del clima terrestre e quindi una più rigorosa valutazione dei trend climatici e di medie statisticamente significative.

Analisi di serie temporali, un caso di studio: la temperatura superficiale del mar Mediterraneo

La stima delle variazioni a lungo termine della SST è fondamentale per definire lo stato attuale degli oceani e per valutare correttamente l'impatto del cambiamento climatico anche su scala regionale. La temperatura superficiale del mare rappresenta infatti un parametro essenziale per la stima degli scambi tra oceano ed atmosfera, essendo direttamente coinvolta sia nel calcolo dei flussi turbolenti oceano-atmosfera sia del bilancio netto della radiazione a onda lunga; inoltre, essa è modulata da questi processi e dalla radiazione solare assorbita dalle acque marine.

La variabilità del campo di SST negli ultimi due secoli è stata analizzata utilizzando un'ampia varietà di informazioni basate su misure in situ e, per le ultime quattro decadi, anche su stime satellitari (Rayner et al, 2003, Marullo et al., 2007, Marullo et al., 2011, Huang

et al, 2017). Il set di dati più importante su cui molte delle ricostruzioni complete, ovvero con dati ricostruiti in ogni punto di griglia, si basano è certamente rappresentato dal “International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set” (ICOADS) che comprende medie mensili di dati marini dal 1662 fino ai nostri giorni su grigliato di 2x2 gradi. ICOADS non contiene dati nei punti di griglia dove le osservazioni in situ non sono state sufficienti per il calcolo statistiche mensili significative. La figura 1 dà un'idea della variabilità della disponibilità di dati dal 1850 in poi da cui risulta, con evidenza, che le ricostruzioni che interpolano i dati su grigliato regolare su base mensile vanno comunque trattate con estrema cautela anche per i periodi più recenti.

D'altra parte, focalizzando l'attenzione su gli ultimi decenni, i dati da satellite costituiscono l'unica sorgente di informazione, derivata da misure, uniformemente distribuita nello spazio e nel tempo con sufficiente risoluzione spaziale e temporale. Nel seguito, come caso di studio esemplificativo, ci concentreremo sul Mar Mediterraneo per l'intervallo temporale che va dal 1982 ad oggi.

Il Mediterraneo come ‘sentinella’ del clima

Su scala regionale il mar Mediterraneo gioca un ruolo di sentinella del riscaldamento globale poiché particolarmente sensibile agli effetti del cambiamento climatico (Giorgi, 2006). Diversi studi hanno infatti mostrato un aumento consistente della SST media del Mediterraneo negli ultimi decenni basandosi esclusivamente sull'analisi di dati satellitari. Inizialmente lo studio delle serie temporali si è basato sui dati dell'Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) Pathfinder SST (Casey et al. 2010), stimando un trend di riscaldamento medio di $0,030 \pm 0,008$ °C/anno nel Mediterraneo occidentale e di $0,050 \pm 0,009$ °C/anno nel bacino

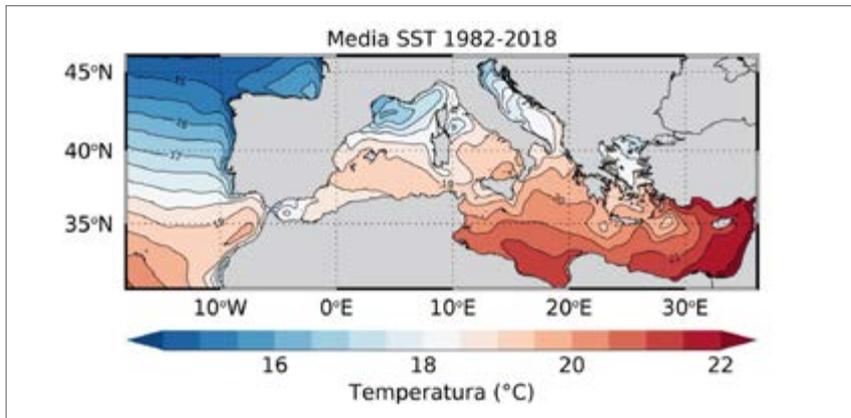


Fig.2 . Temperatura media della superficie del mare (SST) (°C) dal 1982 al 2018 derivata da dati satellitari CMEMS giornalieri

orientale dal 1985 al 2006 (Nykjaer, 2009). Risultati analoghi sono stati ottenuti da Garcia e Belmonte (2011) che hanno stimato un riscaldamento medio di $0,031 \pm 0,003$ °C/anno nel Mediterraneo occidentale dal 1985 al 2007.

In un recente lavoro, Pisano et al. (2020) hanno fornito una versione aggiornata di queste valutazioni basandosi su una più lunga serie temporale (1982-2018) ed utilizzando una mappatura basata sulla combinazione di più satelliti sia in

orbita polare che geostazionaria. L'aria di indagine è riportata in figura 2 come media del periodo 1982-2018.

La distribuzione spaziale della SST mostra la tipica variazione latitudinale con valori più bassi al nord e più alti al sud. Questa distribuzione è comunque movimentata dalle firme superficiali delle maggiori strutture oceanografiche. Tra le più note risaltano con estrema evidenza il vortice a occidente di Creta e il vortice di Rodi, situato tra le isole di Rodi e di Creta, nel Mediterraneo orientale, entrambe caratterizzate da un minimo locale di temperatura (Marullo et al., 1999). Ad occidente, l'acqua relativamente più fredda del Golfo del Leone segna la zona di circolazione ciclonica caratterizzata da importanti eventi di formazione di acque profonde invernali (1999, Somot et al 2018) mentre in prossimità dello stretto di Gibilterra, nel mare di Alboran, le ac-

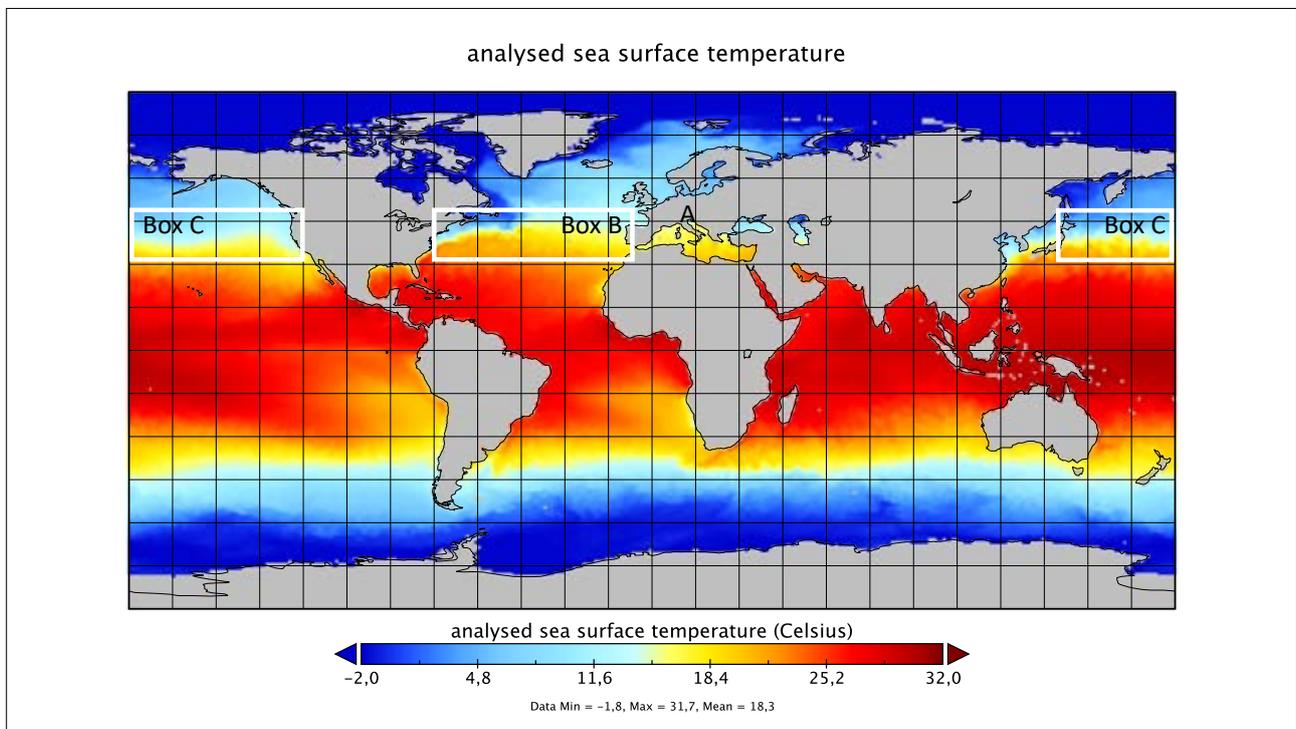


Fig.3 .Temperatura superficiale del mare nel Dicembre 2018. In bianco sono evidenziate le zone di mare utilizzate per il calcolo delle serie temporali riportate in figura 4. Prodotto OSTIA L4 generato utilizzando il sistema di rianalisi OSTIA v3.0 dal MET Office nell'ambito del progetto C3S

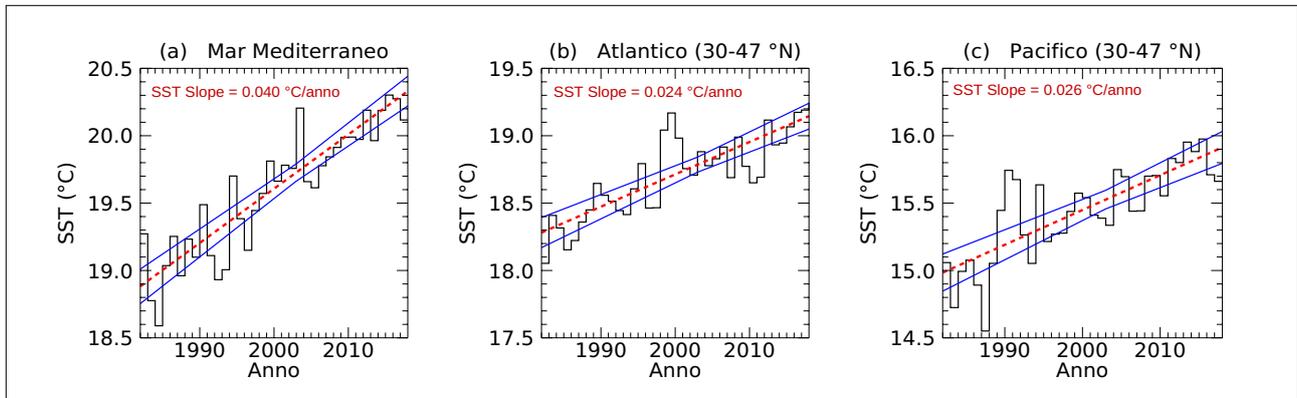


Fig.4. Andamento della media annuale della SST del mar Mediterraneo (a), Atlantico (b) e Pacifico (c) alle stesse latitudini (30–47 °N). La linea tratteggiata in rosso indica il risultato della regressione lineare mentre le due curve in blu definiscono l'intervallo di confidenza risultante da una deviazione standard per la pendenza e per l'intercetta della retta

que più fredde marcano la presenza del vortice di Alboran.

Pisano et al. (2020) hanno già fatto notare la tendenza a una sostanziosa e continua crescita della temperatura superficiale del Mediterraneo, contrapponendola a una situazione di crescita limitata nel box Atlantico, definito dalla zona di mare al di là di Gibilterra in figura 2, e ipotizzando che le tendenze osservate in quella limitata area dell'Atlantico fossero rappresentative dell'intero oceano, almeno alle latitudini del Mediterraneo. In seguito, a valle di una rivisitazione dei calcoli di Pisano et al. 2020 mostreremo la validità della loro ipotesi utilizzando gli stessi dati per il Mediterraneo, allargandosi ad ulteriori set di dati satellitari per il resto degli oceani globali alle latitudini del Mediterraneo (Figura 3).

L'andamento delle temperature medie annuali del Mediterraneo (Figura 4a) mostra infatti una crescita abbastanza continua con una decisa componente lineare che implica una variazione di circa 1.5 °C nell'intervallo temporale considerato dei 37 anni. Discostamenti positivi ed evidenti dalla linearità si osservano negli anni, 1982, 1986,

1990,1994, 1999, 2003 (Marullo e Guarracino, 2003), distribuiti, ad eccezione del 1999, ad intervalli regolari di quattro anni. Dal 2003 in poi discostamenti significativi dalla crescita lineare non sono stati osservati. Discostamenti negativi rispetto alla crescita lineare sono centrati negli anni 1984, 1992 e 1996 e 2005.

L'andamento negli oceani Atlantico e Pacifico

È interessante confrontare l'andamento lineare della crescita di temperatura nel Mediterraneo con il corrispondente andamento osservato negli oceani Atlantico e Pacifico (figure 4b e 4c) alle stesse latitudini. Il tasso di crescita della SST dell'oceano Atlantico alle latitudini del Mediterraneo, 0.024 °C/anno, risulta essere circa la metà di quello osservato nel Mediterraneo. Un analogo comportamento si registra anche nell'oceano Pacifico dove il tasso di crescita lineare è pari a 0.026 °C/anno. D'altra parte, se le differenze tra i tassi di crescita del Mediterraneo e quelle delle corrispondenti aree dell'Atlantico e del Pacifico sono

evidenti, l'analisi più dettagliata delle serie temporali rivela anche altri interessanti dettagli. **In particolare, non si può fare a meno di osservare che all'ininterrotta crescita della temperatura Mediterranea (a meno di oscillazioni lunghe pochi anni) non corrisponde un analogo comportamento nei due oceani.** Di particolare rilievo è infatti la pausa nella crescita della SST Atlantica a partire dal 1998 a cui non corrispondono analoghi comportamenti nel Mediterraneo e nel Pacifico.

L'analisi di dati satellitari descritta in questa breve nota, sia pur utilizzando un particolare caso di studio, mostra chiaramente come **le misure dallo spazio dell'oceano possano contribuire fattivamente alla definizione del clima attuale e alla quantificazione delle variazioni più recenti sfruttando la sinotticità delle misure e la continuità garantita dalle esigenze operative dei servizi meteorologici ed oceanografici.**

Per info: salvatore.marullo@enea.it

BIBLIOGRAFIA

1. Casey, K.S.; Brandon, T.B.; Cornillon, P.; Evans, R. The past, present, and future of the AVHRR Pathfinder SST program. In *Oceanography from Space*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2010; pp. 273–287
2. García, M.L.; Belmonte, A.C. Recent trends of SST in the Western Mediterranean basins from AVHRR Pathfinder data (1985–2007). *Glob. Planet. Chang.* 2011, 78, 127–136.
3. Giorgi, F. Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.* 2006, 33.
4. Huang, B., Thorne, P. W., Banzon, V. F., Boyer, T., Chepurin, G., Lawrimore, J. H., ... & Zhang, H. M. (2017). Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons. *Journal of Climate*, 30(20), 8179–8205.
5. Marullo, S.; Santoleri, R.; Malanotte-Rizzoli, P.; Bergamasco, A. The sea surface temperature field in the Eastern Mediterranean from advanced very high resolution radiometer (AVHRR) data: Part I. Seasonal variability. *J. Mar. Syst.* 1999, 20, 63–81.
6. Marullo, S., & Guarracino, M. (2003). L'anomalia termica del 2003 nel mar Mediterraneo osservata da satellite. *Energia, ambiente e innovazione*, 6(03), 48-53.
7. Marullo, S., Buongiorno Nardelli, B., Guarracino, M., & Santoleri, R. (2007). Observing the Mediterranean Sea from space: 21 years of Pathfinder-AVHRR sea surface temperatures (1985 to 2005): re-analysis and validation. *Ocean Science*, 3(2), 299-310.
8. Marullo, S., Artale, V., & Santoleri, R. (2011). The SST multidecadal variability in the Atlantic–Mediterranean region and its relation to AMO. *Journal of Climate*, 24(16), 4385–4401.
9. Nykjaer, L. Mediterranean Sea surface warming 1985–2006. *Clim. Res.* 2009, 39, 11–17
10. Pisano, A., Marullo, S., Artale, V., Falcini, F., Yang, C., Leonelli, F. E., ... & Buongiorno Nardelli, B. (2020). New evidence of mediterranean climate change and variability from sea surface temperature observations. *Remote Sensing*, 12(1), 132.
11. Rayner, N. A. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander, L. V., Rowell, D. P., ... & Kaplan, A. (2003). Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D14).
12. Somot, S.; Houpert, L.; Sevault, F.; Testor, P.; Bosse, A.; Taupier-Letage, I.; Bouin, M.N.; Waldman, R.; Cassou, C.; Sanchez-Gomez, E.; et al. Characterizing, modelling and understanding the climate variability of the deep water formation in the North-Western Mediterranean Sea. *Clim. Dyn.* 2018, 51, 1179–1210.
13. Von Schuckmann, K., Le Traon, P. Y., Smith, N., Pascual, A., Brasseur, P., Fennel, K., ... & Zuo, H. (2018). Copernicus marine service ocean state report. *Journal of Operational Oceanography*, 11(sup1), S1-S142.
14. World Meteorological Organization. (2017). WMO guidelines on the calculation of climate normals.