



---

PROGRAMMA DI RICERCA STM 2013

Fabio Raicich, ISMAR Trieste

Relazione scientifica sulla ricerca intitolata:

Studio dell'accoppiamento tra oceano e atmosfera attraverso le variazioni congiunte nei regimi di variabili oceaniche, atmosferiche e degli indici di teleconnessioni.

svolta presso:

Federal University of Paraná (UFPR), Center for Marine Studies (CEM), Pontal do Sul, Brasile



## Introduzione

Lo studio dei fenomeni naturali di carattere stocastico ad andamento oscillatorio richiede serie di dati che siano abbastanza lunghe per risolvere le periodicità più lunghe, altrimenti periodi incompleti possono essere interpretati come trends e i complessi legami tra i segnali possono non essere compresi.

Molti sforzi sono stati fatti negli ultimi anni per la costruzione di lunghe serie temporali di molte variabili al fine di catturare oscillazioni naturali di lungo periodo utilizzando, ad esempio, la data archaeology, ricostruzioni paleoclimatiche, modelli accoppiati oceano-atmosfera, telerilevamento. Diverse tecniche di analisi e datasets hanno condotto a riconoscere un gran numero di modi di variabilità atmosferica e oceanica, chiamati teleconnessioni, oscillazioni, dipoli (Garreaud et al., 2009), ma la maggior parte della varianza associata alle loro fluttuazioni sembra risiedere in un paio di modi globali tra i quali El Niño-Southern Oscillation (ENSO) e la North Atlantic Oscillation (NAO).

La comprensione delle teleconnessioni globali rappresenta un contributo alla prevedibilità delle fluttuazioni climatiche su scale temporali decadal, che può essere rilevante anche a livello regionale, come nell'Atlantico sudoccidentale e nel Mediterraneo, bacini di particolare interesse nell'ambito della collaborazione tra ISMAR e CFM/UFPR. Le posizioni geografiche di quelle regioni fanno sì che risentano delle influenze sia dei regimi climatici tropicali di quelli delle medie latitudini.

ENSO è di solito considerato come il più importante modo di variabilità su gran parte delle zone tropicali e subtropicali (Quadrelli and Wallace, 2004), coinvolgendo drastici cambiamenti nella posizione e l'intensità della convezione tropicale. ENSO è in genere legato a meccanismi di feedback non lineari tra l'oceano e l'atmosfera soprattutto nell'Oceano Pacifico equatoriale, ma tali da coinvolgere anche altre regioni del globo tramite teleconnessioni.

La NAO è il modo dominante variabilità della circolazione atmosferica sul Nord Atlantico ed ha mostra il segnale più forte in inverno, quando la sua fase positiva (negativa) presenta più (meno) intense



bassa pressione dell'Islanda e alta pressione delle Azzorre (Hurrell et al., 2003). La NAO esercita un'influenza dominante sulle temperature superficiali in inverno e sulla frequenza delle perturbazioni e sulle precipitazioni in Europa e nord Africa. NAO positiva implica forti venti occidentali sul nord Atlantico, che portano aria relativamente calda e umida verso il nord Europa, mentre condizioni di siccità prevalgono sul sud Europa e sul nord Africa.

L'intensità e la tempistica delle fluttuazioni climatiche interannuali e interdecadali mostrano una notevole dipendenza geografica, essendo alcune regioni più influenzate da fenomeni di grande scala originate negli oceani tropicali, mentre altre sono più influenzate da fenomeni tipici delle medie e alte latitudini.

Quindi, seguire le fluttuazioni di ENSO, NAO e le altre oscillazioni atmosferiche e oceaniche, potrebbe contribuire a comprendere la dinamica del clima dalla scala locale a quella globale. Oltre a oscillazioni a scale dalla sinottica alla decadale, in ENSO e altri indici sono stati osservati cambi di regime, che si verificano irregolarmente nel tempo. Inoltre, l'intensità della relazione tra ENSO e il clima su scala regionale ha mostrato una notevole variabilità nel 20° secolo, probabilmente a causa di cambi nel comportamento ENSO e / o di altri fattori (Garreaud et al., 2009).

Negli anni '70 del 20° secolo è stato osservato un brusco cambio dello stato del clima alle medie latitudini nonché nel Pacifico tropicale (Trenberth and Hurrell, 1994). Nel frattempo, le principali caratteristiche di variabilità interannuale sul Pacifico tropicale sono cambiate (Wang and An, 2001; An et al., 2005). E' ancora incerto se il sistema ENSO interpreti il ruolo di causa o effetto, ma si pensa che il cambio di regime climatico alla fine degli anni '70 sia legato a un cambiamento del modo principale della variabilità di ENSO (Garreaud et al., 2009). Inoltre, l'inversione si è verificata da una fase NAO prevalentemente negativa, tipica degli anni '60, ad una fortemente positiva fino a metà degli anni '90 (Hurrell et al., 2003).



Una prima indagine, volta a studiare i cambiamenti di regime osservati nel livello marino, ha messo in evidenza che nel determinare la variazione degli anni '70 probabilmente è il contenuto di calore dell'oceano a giocare il ruolo principale; inoltre i bacini dell'emisfero settentrionale sembrano reagire per primi (Marone et al., 2013).

Il cambio di regime degli anni '70 rappresenta un importante esempio, che suggerisce di cercare bruschi cambiamenti in parametri chiave per l'oceano e l'atmosfera. Un punto cruciale è riconoscere possibili relazioni causa-effetto. Essendo lo studio di tipo statistico, non è ovviamente possibile indagare sulla causalità, tuttavia è possibile riscontrare indizi di possibili collegamenti tra le diverse variabili, oppure escludere relazioni causali sulla base della tempistica (l'effetto deve seguire la causa).

## Dati

Le variabili da studiare riguardano sia il mare sia l'atmosfera. L'approccio iniziale prevedeva di considerare i seguenti dati:

- a) campi mensili di variabili atmosferiche ottenuti dal dataset "Twentieth Century Reanalysis (V2)" ([www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.20thC\\_ReanV2.html](http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.20thC_ReanV2.html)): temperatura dell'aria, pressione atmosferica, vento zonale, vento meridionale, tutti presso la superficie e alla tropopausa, altezza del geopotenziale alla tropopausa; si tratta di dati definiti per latitudine da 90° N a 90° S e longitudine da 0° a 178° E, a passi di 2° in entrambe le coordinate;
- b) campi mensili di temperatura superficiale del mare (SST) ottenuti dal dataset "Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (v3b)" ([www.ncdc.noaa.gov/ersst](http://www.ncdc.noaa.gov/ersst)); i dati sono definiti per latitudine da 88° N a 88° S e longitudine da 0° a 178° E, a passi di 2° in entrambe le coordinate;



c) serie temporali di indici climatici ([www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/](http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/)), i principali tra i quali: GLobally integrated Atmospheric Angular Momentum, Quasi-Biennial Oscillation, Arctic Oscillation, Antarctic Oscillation, All-India Rainfall, Eastern Asia/Western Russia, Atlantic Multidecadal Oscillation, North Atlantic Oscillation, Atlantic Meridional Mode, Brazil precipitation, Sahel precipitation, Western Hemisphere Warm Pool, East Pacific/North Pacific Oscillation, Pacific Decadal Oscillation, Multivariate ENSO, Pacific Warm Pool. Tutte le serie sono definite su base mensile tranne All-India Rainfall, Brazil precipitation e Sahel precipitation, che sono definite su base annuale.

La grande massa di dati e la lunga durata dei run richiesta dall'analisi ha reso impraticabile l'obiettivo iniziale, essendo impossibile analizzare tutti i parametri applicando più lunghezze di cut-off e più valori della confidenza, per ottenere confronti tra i vari casi. Si è quindi deciso di restringere l'analisi ad alcune variabili e alcuni indici climatici che risultano particolarmente significativi nel descrivere la variabilità del clima alle scale temporali di interesse, ossia 4-10 anni. Si sono dunque studiati la temperatura dell'aria e la pressione atmosferica alla superficie, la SST e gli indici Multivariate ENSO (MEI) (che presenta le stesse caratteristiche di variabilità di quasi tutti gli indici legati a El Niño) e North Atlantic Oscillation (NAO).

## Metodo

Un cambio di regime è definito come una rapida riorganizzazione di un sistema naturale da uno stato relativamente stabile a un altro. Nell'oceano ciascuno stato può durare per anni o decenni e il cambio spesso coincide con cambiamenti nel clima.

Per riconoscere il cambio di regime viene usato il metodo chiamato Sequential t-test Analysis of Regime Shifts (STARS), basato sulla media e sviluppato da Rodionov (2004). Considerando una serie



temporale  $x_1, \dots, x_n$ , quando arriva un nuovo dato  $x_{n+1}$  viene effettuata una verifica per determinare se esso rappresenta una deviazione statisticamente significativa dalla media dei dati precedenti, che costituisce il “regime” corrente. Se sì, l’epoca, in cui  $x_{n+1}$  è osservato, è candidata come punto di cambio di regime  $c$ . Questa ipotesi viene verificata usando osservazioni successive per mezzo del Regime Shift Index ( $RSI$ ), che viene calcolato per ogni  $c$ :

$$RSI_c = \sum_{i=c}^{c+m} \frac{x_i^*}{L\sigma_L}$$

dove  $m = 0, \dots, L-1$ , cioè il numero di dati (corrispondenti ad anni se si ha un dato annuale) dopo l’inizio del nuovo regime, essendo  $L$  la lunghezza di cut-off dei regimi e  $\sigma_L$  la deviazione standard media per tutti gli intervalli lunghi  $L$  nella serie temporale.  $RSI$  rappresenta una somma cumulativa di deviazioni normalizzate  $x_i^*$  dalla media (ipotetica) del nuovo regime ( $x_{new}$ ), tale che la differenza  $diff$  rispetto al regime corrente ( $x_{cur}$ ) sia statisticamente significativa sulla base del t-test di Student:

$$diff = x_{new} - x_{cur} = t \sqrt{\frac{2\sigma_L^2}{L}}$$

dove  $t$  è il valore della distribuzione  $t$  con  $2L-2$  gradi di libertà al dato livello di confidenza  $p$ . Se, a una qualsiasi epoca dall’inizio del nuovo regime,  $RSI$  cambia segno, il test è significativo e l’ipotesi viene rigettata, altrimenti  $c$  viene definita l’epoca del cambio di regime.

Il metodo prevede la scelta a priori della scala temporale e dell’ampiezza dei cambi di regime. La scala temporale è controllata dalla lunghezza di cut-off ( $L$ ); la stessa e il livello di confidenza ( $p$ ) determinano insieme la minima ampiezza significativa rilevabile. Inoltre, l’utente sceglie il parametro di Huber ( $H$ ), che serve a limitare l’effetto degli outliers nel calcolo delle medie, così da non far pesare troppo eventi che si discostano sensibilmente dalla norma.



Va sottolineato che la lunghezza di cut-off determina un'incertezza sulla determinazione dell'epoca del cambiamento di regime.

## Risultati e commenti

Essendo stato evidenziato un possibile cambio climatico negli anni '70 dello scorso secolo, nel presente lavoro l'analisi è stata concentrata sul periodo dal 1950 in poi. Per la lunghezza di cut-off sono stati usati  $L = 4$  e 10 anni, per la confidenza  $p = 0.01$  e 0.1, e per il parametro di Huber  $H = 3$ .

L'analisi ha portato alla creazione di datasets (uno per ogni terna di  $L$ ,  $p$  e  $H$ ) dell'indice  $RSI$  in funzione di latitudine, longitudine e mese; mediando sui mesi è stato ottenuto un  $RSI$  su base annuale. Per ogni anno è stato quindi possibile evidenziare le aree dove  $RSI \neq 0$ , ossia dove sono stati riscontrati cambiamenti di regime significativi.

L'esame completo dei risultati non è concluso, tuttavia, preliminarmente, si possono riportare esempi di alcuni notevoli cambiamenti di regime. Nelle figure 1 e 2 sono riportati tali risultati per temperatura dell'aria, pressione e SST, relativamente al 1976 e al 1995, rispettivamente, confrontando i casi con  $L = 4$  anni (a) e  $L = 10$  anni (b);  $p$  è sempre pari a 0.01.

Nel 1976 (Fig. 1) si può notare che in gran parte del Pacifico e dell'Atlantico tropicali tutti e tre i parametri mostrano cambiamenti di regime significativi; anche l'Europa settentrionale e l'Artico sono sedi di cambiamenti di regime, soprattutto per la temperatura (in alto) e la pressione (al centro). Le due lunghezze di cut-off determinano qualche differenza nei dettagli, ma le caratteristiche dominanti sono presenti in entrambi i casi.

Nel 1995 (Fig. 2) si notano cambiamenti di regime sull'Atlantico tropicale e settentrionale in tutti e tre i parametri. Anche il Pacifico è interessato da cambiamenti di regime nella temperatura dell'aria (in



alto) e nella SST (in basso), specialmente nella parte occidentale, verso l'Asia e l'Australia, mentre nel 1976 anche le aree orientali, prossime al continente americano, sono coinvolte nel cambiamento di regime.

Tra il 1976 e il 1977 il MEI mostra un cambiamento di regime con media in aumento per entrambe le lunghezze di cut-off, mentre nel 1995 sia il MEI sia la NAO mostrano medie in diminuzione. Da notare che l'analisi STARS applicata alla NAO è meno sensibile alle variazioni della media di quanto lo sia per il MEI, poiché la soglia di significatività di un cambiamento di regime dipende dal parametro  $\sigma_L$ , che quantifica la variabilità media. Nel caso della NAO esso è relativamente grande, pertanto è meno probabile trovare cambiamenti di regime significativi.

## Ringraziamenti

Si ringraziano la Prof. Eunice da Costa Machado, direttore del CEM, per l'ospitalità, e il Prof. Eduardo Marone, direttore del Gruppo di Fisica Marina, in collaborazione con il quale la ricerca viene svolta.

## Bibliografia

An, S.-I., W. W. Hsieh, e F.-F. Jin (2005). A nonlinear analysis of the ENSO cycle and its interdecadal changes, *J. Clim.*, 18, 3229-3239.

Garreaud, R.D., M. Vuille, R. Compagnucci, e J. Marengo (2009) Present-day South American climate. *Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol.*, 281 (2009) 180-195.



---

Hurrell, J.W., Y. Kushnir, M. Visbeck, e G. Ottersen (2003). An Overview of the North Atlantic Oscillation. The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact. Geophysical Monograph Series, 134, AGU, Washington, DC, USA, pp. 1-35.

Marone, E., R. Mosetti, F. Raicich e R. Camargo (2013). From ocean heat content to sea level: The path of regime shifts and teleconnections. *Sottomesso a Journal of Climate*.

Quadrelli, R., e J.M. Wallace (2004). A simplified linear framework for interpreting patterns of northern hemisphere wintertime climate variability. *J. Clim.* 17, 3728-3744.

Trenberth, K.E., e J.W. Hurrell (1994). Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific, *Clim. Dyn.*, 9, 303-319.

Wang, B., e S.-I. An (2001). Why the properties of El Nino changed during the late 1970s, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3709-3712.

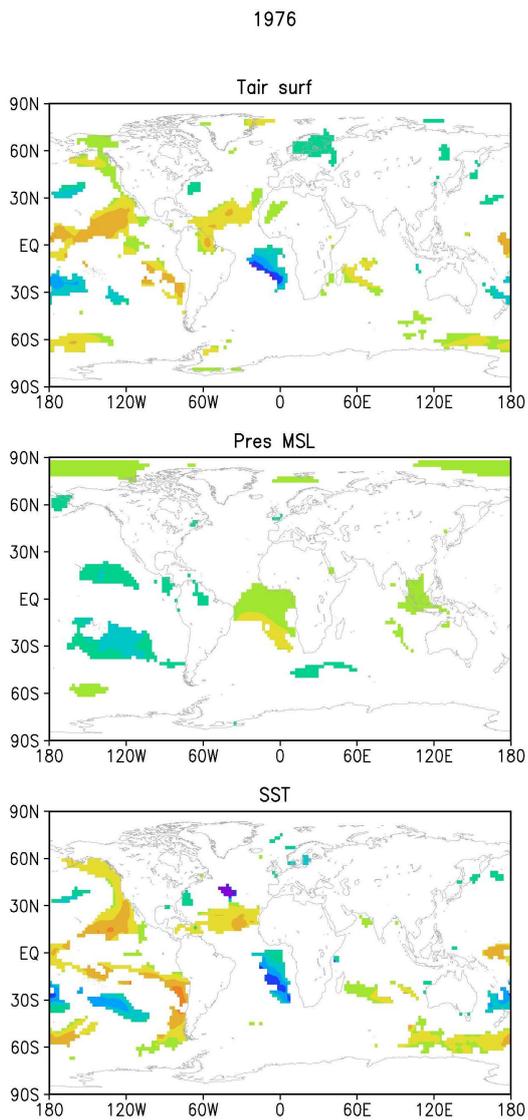


Figura 1a

RSI per il 1976 con  $L = 4$  anni e  $p = 0.01$ . In alto la temperatura dell'aria in superficie, al centro la pressione in superficie e in basso la SST.

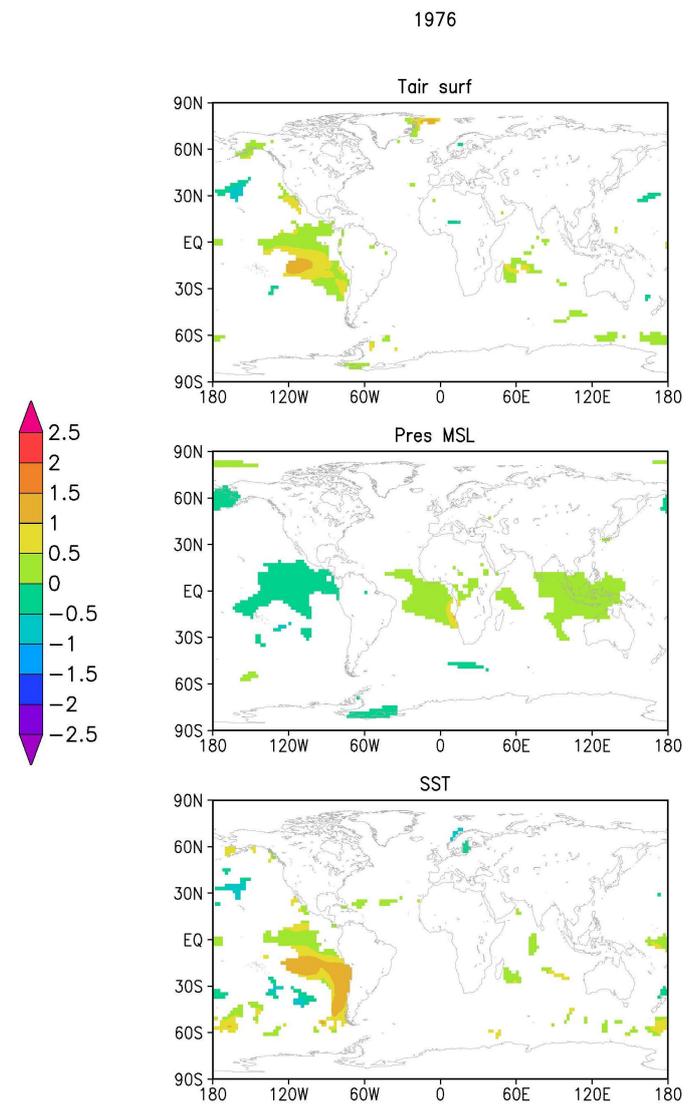


Figura 1b

Come in Figura 1a con  $L = 10$  anni.

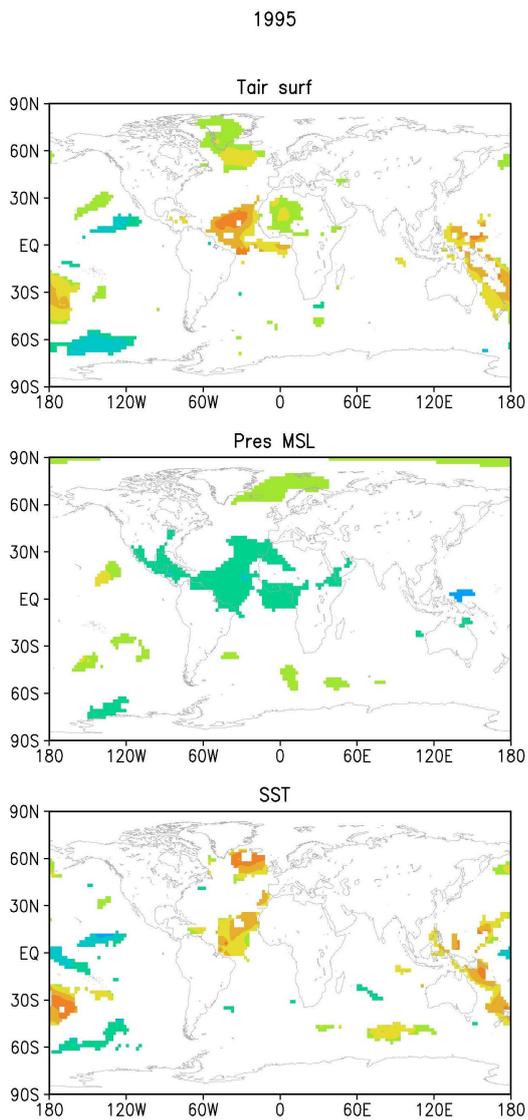


Figura 2a

RSI per il 1995 con  $L = 4$  anni e  $p = 0.01$ . In alto la temperatura dell'aria in superficie, al centro la pressione in superficie e in basso la SST.

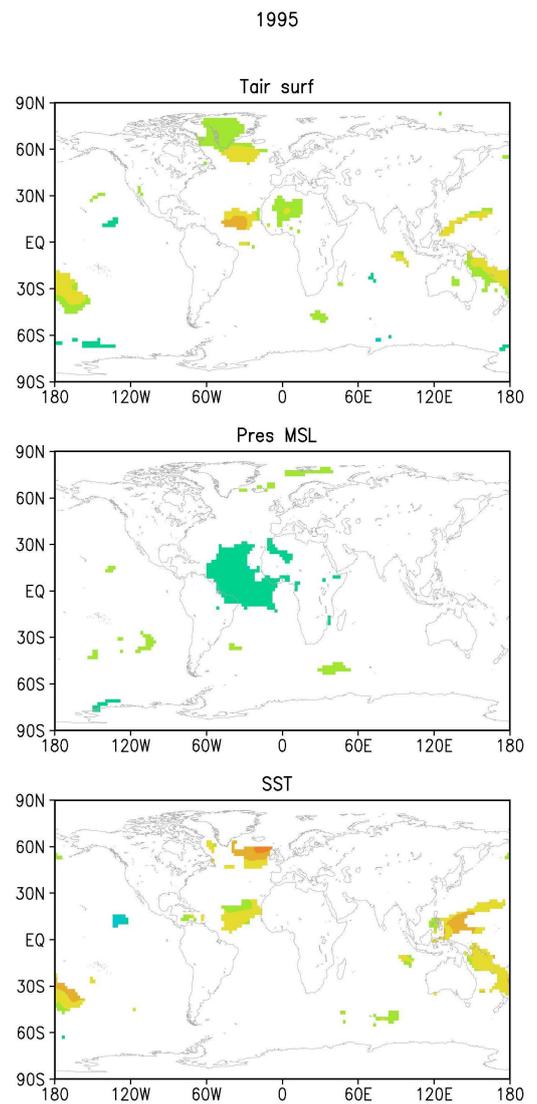


Figura 2b

Come in Figura 2a con  $L = 10$  anni.

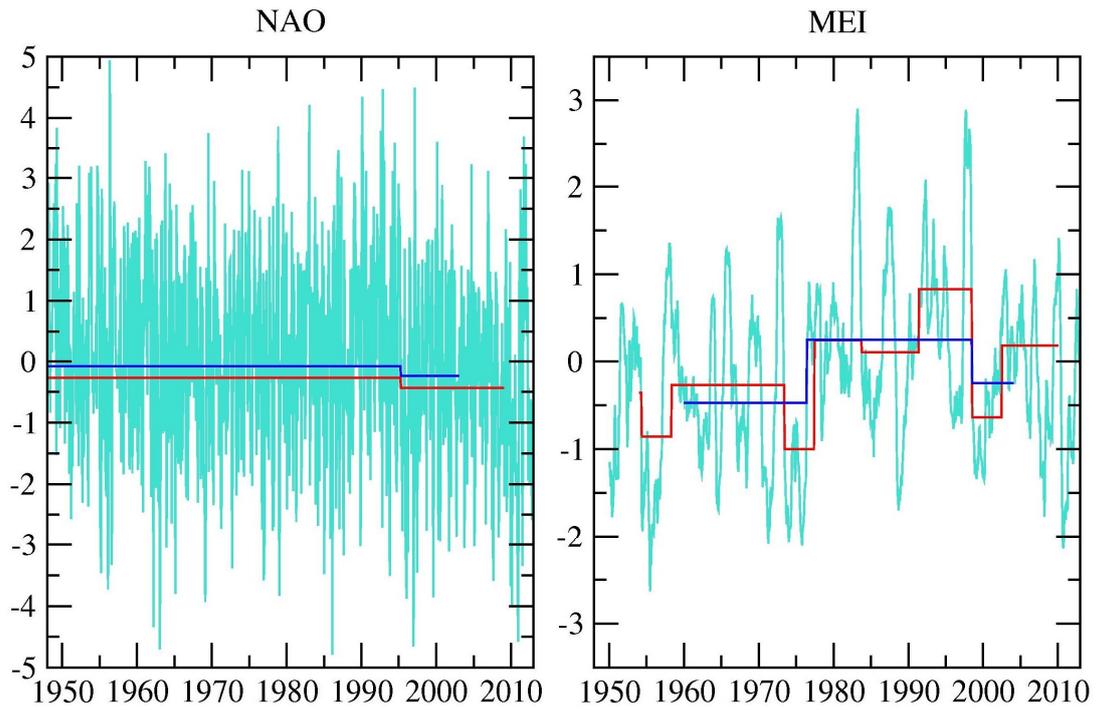


Figura 3

Serie temporali mensili di NAO e MEI (curve ciano) e regimi medi dedotti dall'analisi STARS con  $L = 4$  anni (curve rosse) e  $L = 10$  anni (curve blu);  $p = 0.01$  in entrambi i casi.