

# L'omogeneizzazione delle serie annuali di temperatura

Barbara Suatoni\*, Andrea Toreti\*

Lavoro pervenuto in redazione il 17/01/2005

**Sommario** – *Le serie storiche di dati meteorologici possono essere influenzate da variazioni delle condizioni di misura delle variabili; queste alterazioni possono falsare i segnali climatici e condurre a valutazioni non corrette. I test di omogeneità costituiscono uno strumento indispensabile per rilevare e filtrare tali alterazioni e ottenere delle serie omogenee. Dopo un'illustrazione sintetica dei principi su cui sono fondati i test più diffusi - con particolare attenzione allo Standard Normal Homogeneity Test (SNHT) e a quello di Craddock, vengono presentati, come esempio significativo, i risultati ottenuti analizzando la serie delle temperature medie annuali della stazione UGM di Pratica di Mare.*

**Summary** – *Changes in the logistic or instrumentation of the measurement of meteorological variables can affect meteorological data series; these changes can alter climatic signals and may lead to incorrect evaluations. Homogeneity tests are an essential instrument to detect and filter them and to obtain homogeneous series. A review of the most popular homogeneity test is presented, with special emphasis on the Standard Normal Homogeneity Test (SNHT) and Craddock test, followed by an application of these methods to annual mean temperature series of the UGM Pratica di Mare station.*

## Introduzione

Lo studio del clima e dei suoi cambiamenti si basa sull'analisi delle serie temporali delle più importanti variabili meteorologiche, quali la temperatura media e la precipitazione cumulata. La quantità e la qualità dei dati originali rilevati dalle stazioni di osservazione meteorologica possono influenzare notevolmente le analisi stesse; i segnali climatici, infatti, possono essere 'falsati' o irrimediabilmente alterati da fattori antropici che possono avere origine dalle diverse fasi del processo di acquisizione ed elaborazione dei dati. La posizione della stazione di misura, la tipologia degli strumenti usati, le formule utilizzate per calcolare alcune grandezze derivate, il territorio e le pratiche di rilevamento dell'osservatore costituiscono un sistema complesso di fattori che condiziona i valori misurati e registrati. Lo spostamento della stazione di rilevamento è una delle cause più frequenti di disomogeneità, che in genere si manifesta con una variazione improvvisa, positiva o negativa, del valore medio della serie; diversamente cambiamenti gradualmente, come l'urbanizzazione o la crescita di vegetazione nei pressi della stazione, influenzano nel tempo la serie creando dei trend artificiali. È pertanto evidente la necessità di utilizzare serie omogenee, cioè con variazioni imputabili so-

lo a cause meteo-climatiche [1]; questa esigenza ha condotto allo sviluppo di metodologie e tecniche in grado di individuare e filtrare eventuali segnali di natura non climatica dalle serie temporali. La necessità e, al tempo stesso, l'occasione di applicare i test di omogeneità alle serie temporali delle variabili meteorologiche e di verificarne i risultati, si è presentata agli autori nell'ambito dello sviluppo e dell'utilizzo del Sistema nazionale per la raccolta, l'elaborazione e la diffusione di dati Climatologici di Interesse Ambientale (SCIA) [2], realizzato dall'APAT, nell'ambito dei propri compiti di gestione e sviluppo del sistema informativo nazionale ambientale, in collaborazione con l'Ufficio Generale per la Meteorologia dell'Aeronautica Militare (UGM), l'Ufficio Centrale di Ecologia Agraria del MiPAF (UCEA) e il Servizio Idrometeorologico dell'ARPA Emilia-Romagna. Il sistema SCIA elabora con metodologie omogenee e rende disponibili i valori decadal, mensili e annuali delle variabili misurate dalle stazioni delle diverse reti meteorologiche, e consente, tra l'altro, di analizzare lunghe serie temporali e di valutare l'eventuale presenza di trend climatici. Come già detto, un requisito di fondamentale importanza per lo svolgimento di tali analisi è costituito dall'omogeneità delle serie stesse.

\* APAT – Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici.

### Metodi di omogeneizzazione

I metodi di omogeneizzazione possono essere suddivisi genericamente in metodi diretti e indiretti. I primi si basano sull'uso dei metadati, ossia la raccolta di tutte le informazioni relative alla stazione (strumenti utilizzati, posizione, esposizione, ecc...); i secondi si servono di analisi statistiche e del supporto dei metadati, se disponibili. I metodi diretti sono influenzati dalla qualità dei metadati, dalla loro completezza e dalle tecniche usate per quantificare gli eventuali fattori di correzione; ad esempio, un cambiamento della strumentazione – da riportare nei metadati – comporta un periodo temporale, sufficientemente lungo, durante il quale si effettuano misure parallele (con entrambe le strumentazioni, vecchia e nuova), in base alle quali si ottiene un coefficiente di correzione da usare per omogeneizzare la serie. Cambiamenti lontani nel tempo, ma riportati nei metadati, possono essere riprodotti artificialmente per ottenere una quantificazione numerica del fenomeno. I metodi indiretti, invece, utilizzano i metadati solamente a supporto e conferma dei risultati ottenuti attraverso analisi statistiche. Questi metodi sono i più diffusi, a causa della loro facilità di applicazione e della frequente indisponibilità di metadati corretti e completi. La maggior parte delle analisi statistiche si serve di una serie di riferimento, opportunamente costruita, con la quale confrontare la serie da testare; in alcuni casi (per esempio stazioni isolate), non è possibile creare questa serie e si possono applicare tecniche diverse [3], che però non garantiscono risultati ottimali in quanto segnali climatici reali possono essere interpretati come disomogeneità. La procedura di creazione della serie di riferimento è la parte più delicata del processo di omogeneizzazione, perché richiede la scelta di un certo numero di stazioni (che dipende dalla densità, ma non può comunque essere inferiore a due) che, messe insieme attraverso una media pesata, forniscano una serie omogenea e in grado di rappresentare la climatologia dell'area in cui si trova la stazione presa in esame. Il criterio da adottare nella scelta delle stazioni è quello del migliore coefficiente di correlazione con la serie in esame, ma con delle opportune limitazioni geografiche da stabilire caso per caso e dipendenti dalla morfologia del territorio e dalla distribuzione. Peterson e Easterling [4] hanno mostrato che il calcolo della correlazione risulta più attendibile se si usano, al posto delle serie dei valori, le serie delle differenze prime.

Se indichiamo la serie temporale con

$\{T_i\}_{i \in I}$   $I = \{1, 2, \dots, n\}$ , la serie delle differenze prime è definita come:

$(dT/dt)_i = T_{i+1} - T_i$ . I coefficienti di correlazione devono riferirsi sempre allo stesso periodo, scelto in modo che ogni singola serie non abbia valori mancanti (in pratica questo si riesce ad ottenere solo tramite procedure di ricostruzione; in alternativa si possono accettare periodi con un numero di 'buchi' limitato, da valutare in relazione alla lunghezza del periodo).

La media pesata per la costruzione della serie di riferimento  $\{S_i\}_{i \in I}$ , nel caso della temperatura, può essere costruita utilizzando la formula individuata da Alexandersson e Moberg [5]:

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^k \rho_j^2 [X_{ji} - \bar{X}_j + \bar{Y}]}{\sum_{j=1}^k \rho_j^2}$$

dove:  $X_{ji}$  indica il valore  $i$ -esimo della  $j$ -esima serie  $X_j$ ,  $\bar{X}_j$  la media della  $j$ -esima serie  $X_j$ ,  $\bar{Y}$  la media della serie in esame,  $\rho_j$  il coefficiente di correlazione tra la serie delle differenze prime in esame e la serie  $j$ -esima delle differenze prime,  $k$  il numero di stazioni scelte per creare la serie di riferimento. Tutti i valori medi devono essere calcolati su un periodo comune, per evitare sovrastime o sottostime.

I test per rilevare eventuali disomogeneità attraverso il confronto con la serie di riferimento sono molteplici, parametrici e non; i principali sono:

- Standard Normal Homogeneity Test (SNHT) [5, 6]: è il test sviluppato da Alexandersson e Moberg, è stato usato in questo studio ed è descritto più avanti;
- Multiple Linear Regression [7]: si basa sull'applicazione successiva di quattro modelli di regressione;
- Craddock test [8]: è un test non parametrico che valuta l'andamento nel tempo della quantità

$$s_i = s_{i-1} + \frac{b_m}{a_m} a_i - b_i$$

- dove:  $a$  indica la serie di riferimento,  $b$  quella in esame,  $a_m$  e  $b_m$  le rispettive medie;
- Multiple Analysis of Series for Homogenization (MASH) [9]: è stato sviluppato dal Servizio Meteorologico Ungherese ed è costituito da un insieme di applicazioni che rilevano e valutano le disomogeneità attraverso mutui con-

fronti tra le serie appartenenti alla stessa area climatica.

Nel presente lavoro è stato utilizzato principalmente lo SNHT, con il supporto del test di Craddock; entrambi sono contraddistinti da un'elevata sensibilità e da una facilità d'implementazione.

Lo SNHT è un test parametrico in grado di rilevare shift e trend lineari, tramite il confronto della serie in esame  $\{Y_i\}_{i \in I}$  con una serie di riferimento  $\{S_i\}_{i \in I}$ ; rientra, inoltre, nella categoria dei 'likelihood ratio test'.

Il primo passo consiste nella creazione di una serie  $\{Z_i\}_{i \in I}$ , ottenuta standardizzando (tramite la deviazione standard del campione  $\sigma_Q$ ) la serie delle differenze

$$\{Q_i\}_{i \in I} \text{ con } Q_i = Y_i - S_i, \\ Z_i = \frac{Q_i - \bar{Q}}{\sigma_Q}.$$

Se si vogliono individuare singoli shift del livello medio della serie in esame, le due ipotesi (quella nulla e l'alternativa) devono assumere la forma:

$$H_0: Z_i \in N(0,1) \text{ con } i \in I = \{1, 2, \dots, n\}; H_1: \begin{cases} Z_i \in N(\eta_1, 1) & i \in \{1, 2, \dots, a\} \\ Z_i \in N(\eta_2, 1) & i \in \{a+1, \dots, n\} \end{cases}$$

dove  $N(\eta, \sigma)$  indica la distribuzione normale.

L'ipotesi nulla afferma che la serie in esame è omogenea, mentre l'ipotesi alternativa indica che il livello medio cambia improvvisamente nell'anno  $a$ .

La statistica usata è, come precedentemente detto, calcolata a partire dal rapporto tra la probabilità che  $H_1$  sia corretta e la probabilità che  $H_0$  sia corretta, da cui si ottiene:

$$T_{\max} = \max_{1 \leq a \leq n-1} \{T_a\} = \max_{1 \leq a \leq n-1} \{az_1 + (n-a)z_2\}$$

dove  $\bar{z}_1$  e  $\bar{z}_2$  indicano, rispettivamente, la media aritmetica della serie  $\{z_i\}$  fino all'anno  $a$  e dopo l'anno  $a$ . Se il valore del massimo della  $T_a$  supera il valore di soglia, determinato dal numero di dati a disposizione e dal livello di confidenza scelto, allora l'ipotesi nulla è da rigettare e a rappresenta l'anno in cui è avvenuto lo shift. La tabella 1 mostra alcuni valori di soglia, per diver-

| $n$      | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | 100  | 150  | 250  |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $T_{90}$ | 5.05 | 6.10 | 6.65 | 7.00 | 7.25 | 7.40 | 7.55 | 7.70 | 7.80 | 7.85 | 8.05 | 8.35 |
| $T_{95}$ | 5.07 | 6.95 | 7.65 | 8.10 | 8.45 | 8.65 | 8.80 | 8.95 | 9.05 | 9.15 | 9.35 | 9.70 |

Tabella 1.

si valori del numero dati  $n$  in corrispondenza dei livelli di confidenza 90% e 95%.

Se si individua uno shift allora è opportuno dividere la serie in due periodi, prima e dopo, e riapplicare il test a entrambi, per verificare l'eventuale presenza di altri shift. Nel caso in cui si sia rilevato un unico shift, si corregge omogeneizzando il periodo precedente con quello successivo, determinando il coefficiente di correzione  $q_2 - q_1$ , dove  $q_2$  e  $q_1$  indicano i livelli medi della differenza prima e dopo lo shift, ossia:  $q_i = \sigma_Q z_i + Q$  con  $i=1,2$ . Il test di Craddock, invece, è un test non parametrico e come tale non fa ipotesi sulle distribuzioni, ma richiede una valutazione qualitativa delle variazioni della derivata prima della funzione  $s(t)$ , introdotta nel paragrafo precedente; infatti, se la serie in esame è omogenea, la  $s(t)$  oscilla intorno allo zero (in linea teorica dovrebbe essere costante e pari a zero, ma esistono in pratica dei rumori), mantenendo la derivata prima continua.

#### Applicazione ai dati del CNMCA

A titolo di esempio, vengono illustrati i risultati dell'omogeneizzazione della serie di dati annuali di temperatura media della stazione di Pratica di Mare, che fa parte della rete dell'UGM e della rete sinottica dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale. Per temperatura media si intende qui la media aritmetica tra il valore massimo e minimo giornaliero, che è stata preferita al valore medio tra tutti i dati giornalieri disponibili, a causa della irregolarità dei dati disponibili alle diverse ore. Il periodo considerato va dal 1961 al 2003. I coefficienti di correlazione sono stati calcolati (sulle serie delle differenze prime dal 1967 al 1999) per tutte le stazioni operative non automatiche; le cinque stazioni maggiormente correlate sono riportate in tabella 2.

| Nome           | Coeff. Di correlazione |
|----------------|------------------------|
| Pisa           | 0.900345               |
| Guidonia       | 0.899964               |
| Latina         | 0.898757               |
| Roma Ciampino  | 0.897247               |
| Vigna di Valle | 0.896054               |

Tabella 2.

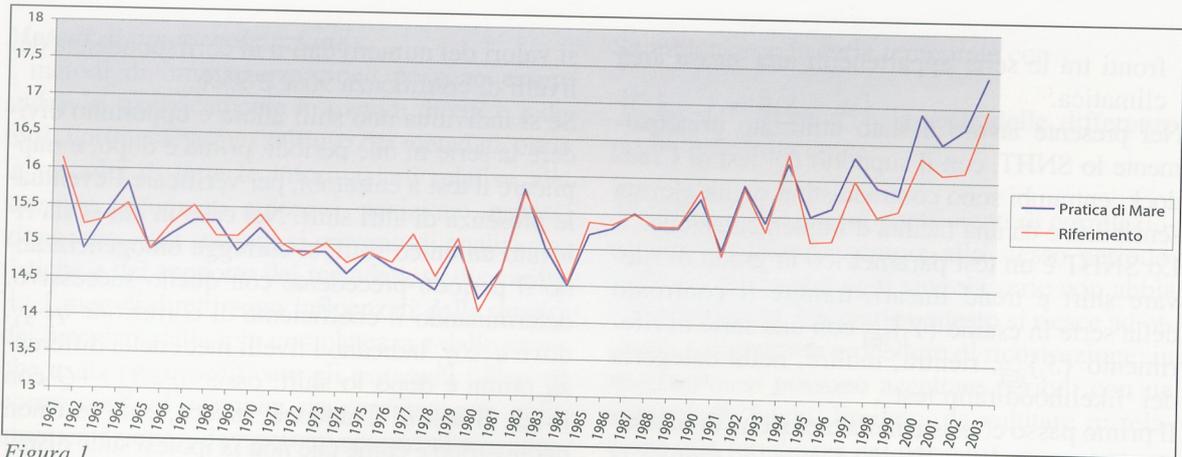


Figura 1

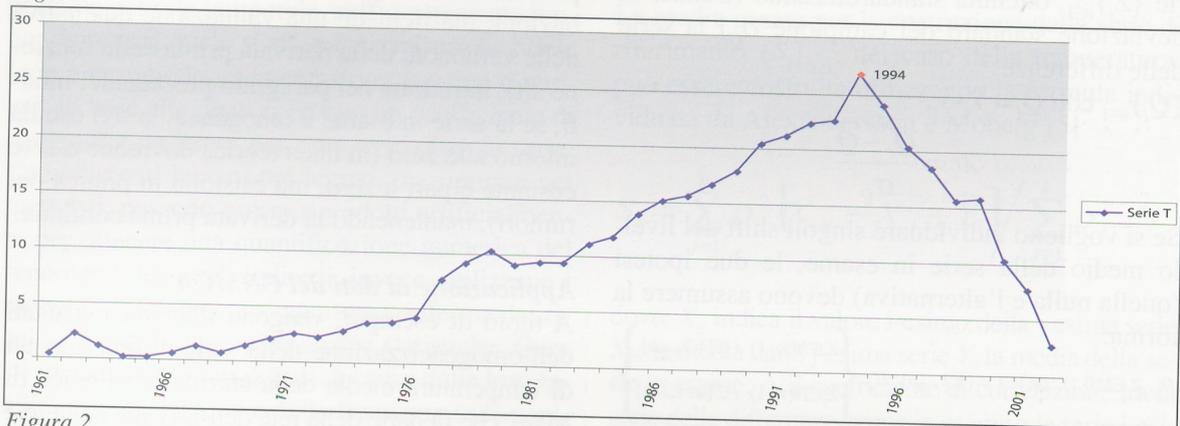


Figura 2

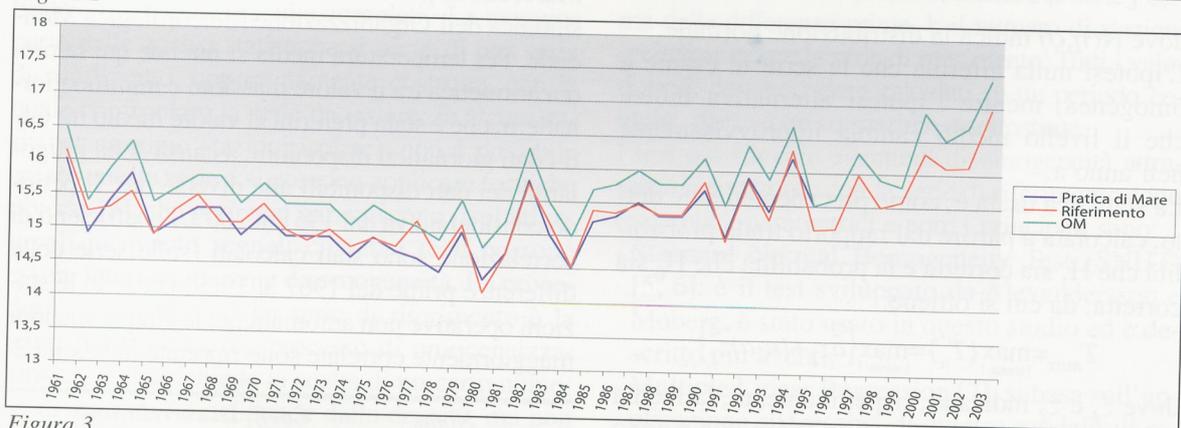


Figura 3



Figura 4

Il grafico in figura 1 mostra l'andamento della serie di riferimento, ottenuta dalle cinque stazioni considerate, e della serie di Pratica di Mare.

Il test SNHT ha individuato uno shift nell'anno 1994, come si deduce dall'andamento della statistica  $T_a$  osservabile in figura 2.

Il test è stato applicato nuovamente al periodo precedente 1961-1994 (e non al periodo successivo 1995-2003, perché inferiore a dieci anni) e non sono state individuate ulteriori disomogeneità. Lo shift trovato è stato considerato valido, ai fini dell'omogeneizzazione, poiché la discontinuità della serie ha trovato riscontro nei metadati, che riportano uno spostamento della stazione di rilevamento nel marzo 1995.

Il coefficiente di correzione,  $q_2 - q_1$ , è risultato pari a 0.4825 °C, e il periodo 1961-1994 (estremi compresi) è stato omogeneizzato con il periodo più recente utilizzando questo valore; ovverossia i dati antecedenti al 1995 sono stati corretti in modo da apparire come se fossero stati sempre osservati e/o misurati sotto le stesse condizioni operative del periodo più recente, poiché si presuppone che queste condizioni, a meno di ulteriori cambiamenti, permangano nel tempo.

La figura 3 mostra il risultato ottenuto dall'applicazione dalla procedura di omogeneizzazione.

Il risultato è stato confermato anche dal test di Craddock, che mostra una discontinuità proprio nell'anno 1994 (figura 4).

### Conclusioni

I test di omogeneità sono degli strumenti indispensabili per chi voglia utilizzare le serie temporali di variabili meteorologiche per studiare il clima e la sua evoluzione. Ai test si dovrebbe sempre accompagnare, laddove possibile, la ve-

rifica dei risultati tramite l'uso delle informazioni raccolte nei metadati. L'utilizzo di più test contemporaneamente richiede più risorse di tempo ma ha il pregio di fornire una maggiore attendibilità.

Il test SNHT è estremamente sensibile e richiede una particolare attenzione durante le varie fasi della procedura di applicazione; piccoli errori (anche dell'ordine di  $10^{-2}$ ) durante il calcolo, ad esempio, della serie  $\{Q_i\}_{i \in I}$  o della serie  $\{Z_i\}_{i \in I}$ , possono causare grandi deviazioni dalla stima corretta della statistica  $T_a$ . Inoltre bisogna tenere conto di un certo grado di soggettività nell'applicazione dei test, specialmente nella fase di selezione delle stazioni necessarie per la costruzione della serie di riferimento; una conoscenza adeguata della rete e della distribuzione geografica permette di valutare in modo ottimale ogni fattore e di sostituire eventuali stazioni con altre meno correlate.

È da ritenersi comunque opportuno estendere, nei limiti del possibile e nell'ambito della vigente collaborazione tra APAT e UGM, i test di omogeneità e l'eventuale correzione delle serie temporali di temperatura a tutte le stazioni della rete sinottica che, per completezza e qualità delle serie stesse, possono contribuire significativamente allo studio della distribuzione di temperatura e delle sue variazioni sul territorio nazionale.

*Si ringrazia il 3° Servizio 'Climatologia' del CNMCA per la collaborazione nello sviluppo del sistema SCIA.*

To contact:

*suatoni@apat.it*  
*toreti@apat.it*

### Riferimenti bibliografici

- [1] V. Conrad, C. Pollak, *Methods in Climatology*, Harvard University Press, 1950.
- [2] F. Desiato, Il Sistema di elaborazione di indicatori meteorologici SCIA, *IdeAmbiente* 6, 2004.
- [3] I. Zurbenko et al., Detecting discontinuities in time series of upper air data: Development and demonstration of an adaptive filter technique, *J. Climate* 9, 1996.
- [4] Thomas C. Peterson, David R. Easterling, Creation of homogeneous composite climatological reference series, *Intern. J. of Climatology* 14, 1994.
- [5] Hans Alexandersson, Anders Moberg, Homogenization of Swedish temperature data, *Intern. J. of Climatology* 17, 1997.
- [6] Hans Alexandersson, A homogeneity test applied to precipitation data, *J. Climate* 6, 1986.
- [7] L. Vincent, A technique for the identification of inhomogeneities in Canadian temperature series, *J. Climate* 11, 1998.
- [8] J.M. Craddock, Methods of comparing annual rainfall records for climatic purposes, *Weather* 34, 1979.
- [9] T. Szentimrey, Multiple Analysis of Series for Homogenization (MASH), Proceedings of the second seminar for homogenization of surface climatological data, Budapest, 1998.