

## INFLUENZA DELL'OSCILLAZIONE DEL NORD ATLANTICO (NAO) SULLA VARIABILITÀ CLIMATICA E SULLE RISORSE IDRICHE SOTTERRANEE DEGLI ACQUIFERI CARBONATICI DELL'ITALIA MERIDIONALE

### INFLUENCE OF THE NORTH ATLANTIC OSCILLATION (NAO) ON THE CLIMATIC VARIABILITY AND GROUNDWATER RESOURCES IN CARBONATE AQUIFERS OF SOUTHERN ITALY

PANTALEONE DE VITA(\*) & SILVIA FABBRICINO(\*)

(\*) Università degli Studi di Napoli "Federico II", Dipartimento di Scienze della Terra, Via Mezzocannone, 8 - 80138 Napoli, Italy

#### RIASSUNTO

L'analisi delle serie storiche dei dati pluviometrici e termometrici (1921-1999) delle stazioni gestite dall'ex Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (Compartimento di Napoli) ha consentito di rilevare l'evoluzione temporale, a scala regionale, delle caratteristiche climatiche dell'Italia meridionale. Tale analisi è basata principalmente sulla differenza tra le precipitazioni annue ed il valore medio della serie storica, normalizzata rispetto al medesimo valore medio. Le serie pluviometriche esaminate si riferiscono a 18 stazioni, scelte tra quelle con funzionamento maggiormente continuo a partire dal 1921. In questo modo è stata evidenziata, sovrapposta ad un generale trend in decrescita, una variabilità delle precipitazioni caratterizzata da una complessa ciclicità pluriennale correlabile a fenomeni atmosferici, riscontrabili a scala continentale, che condizionano la circolazione nell'area mediterranea delle masse d'aria umida provenienti dall'Oceano Atlantico. In particolare, le fluttuazioni naturali delle precipitazioni in Italia meridionale, analogamente a quanto evidenziato in altre parti del Mediterraneo, sono influenzate dalle variazioni del gradiente barometrico, esistenti tra l'anticiclone delle Azzorre e la depressione dell'Islanda, ovvero dal fenomeno atmosferico noto come Oscillazione del Nord Atlantico (NAO).

Gli effetti di tale fenomeno sulla variabilità della ricarica degli acquiferi sono stati verificati in un'area campione corrispondente all'unità idrogeologica carbonatica del Monte Cervialto, particolarmente significativa per la lunghezza della serie storica delle misure di portata della sorgente Sanità di Caposele (AV), del tutto comparabile a quella delle serie pluviometriche, nonché per l'alimentazione che detta sorgente fornisce ad un importante sistema acquedottistico regionale. Anche in questo caso si manifesta una chiara correlazione tra l'Oscillazione del Nord Atlantico e la variazione pluriennale della ricarica dell'acquifero carbonatico, peraltro rilevata, a scala regionale, pure rispetto alla variabilità delle precipitazioni efficaci.

Questo risultato, sebbene da verificare anche in altri contesti idrogeologici, appare originale soprattutto per l'evidenziazione delle ripercussioni che fenomeni atmosferici rilevabili a scala continentale, ben noti nell'ambito scientifico meteorologico ed oceanografico, hanno sulla ricarica degli acquiferi. Esso pertanto consente di approfondire ulteriormente la comprensione delle relazioni esistenti tra la componente atmosferica e sotterranea del ciclo idrologico. Inoltre, la combi-

#### ABSTRACT

The analysis of precipitation and air temperature time series, recorded by the monitoring network of the ex-Hydrographic and Tidal National Service (Compartment of Naples) in the period 1921-1999, was carried out in order to assess the temporal evolution of climatic characteristics in Southern Italy. To this end, the mean normalised of annual precipitations gathered by 18 rain gauge stations, selected on the basis of the continuity of their records has been mainly analysed. Results exhibit a complex decadal periodicity superimposed to a general decreasing trend. Such observation has been correlated to the North Atlantic Oscillation (NAO), a large scale atmospheric phenomenon influencing the circulation of humid air masses coming into the Mediterranean area from the Atlantic Ocean. The NAO induces annual variations of the barometric gradient between Azores's high and Iceland's low. Among the principal results is the correlation between natural fluctuations of the precipitations in Southern Italy and the NAO, similar to what observed in other Mediterranean areas.

The aquifer recharge decadal variability has been also analysed in a sample basin corresponding to the Monte Cervialto carbonate hydrogeological unit. The sample aquifer is particularly representative both for the discharge time series duration of the spring Sanità in Caposele (AV), comparable with those of the precipitation ones, and for the relevance of this spring for an important regional aqueduct system. A clear relationship between the decadal variability of the aquifer recharge and the NAO has been demonstrated both respect to the spring discharges and, on the regional scale, respect to the effective precipitations.

This result, even if it has to be verified in other type of aquifers, appears original because it demonstrates the influence on the aquifer recharge of a large scale atmospheric phenomenon, well-known in the meteorological and oceanographic scientific framework. It allows further understandings about the relationships existing between the atmospheric and the subterranean components of the hydrological cycle. Moreover, on the basis of the NAO forecasting analyses, this relationship would allow to hypothesise drought scenarios and to plan solutions in order to

nazione di dette relazioni con le analisi predittive della NAO, potrebbe contribuire alla formulazione di scenari critici in base ai quali pianificare appropriate strategie di gestione e di salvaguardia delle risorse idriche sotterranee nelle aree mediterranee.

**PAROLE CHIAVE:** *Italia meridionale, variabilità climatica, siccità, ricarica degli acquiferi, Oscillazione del Nord Atlantico (NAO)*

## PREMESSA

Negli ultimi anni il protrarsi di fenomeni siccitosi, manifestatisi soprattutto a partire dalla fine degli anni '80 anche in termini di riduzione delle portate sorgive e di abbassamento dei livelli piezometrici, ha reso sempre più critico e pressante il problema dell'approvvigionamento e della distribuzione della risorsa idrica in gran parte del territorio nazionale oltre che in altri paesi europei. D'altronde anche dopo la recente introduzione di importanti leggi in materia di risorse idriche (D.Lgs 152/1999 e D.Lgs 152/2006), restano ancora da definire criteri di gestione della risorsa adeguati agli scenari di variabilità climatica. In tale situazione, l'approfondimento delle conoscenze, soprattutto riguardo le complesse interazioni esistenti tra le variazioni climatiche e quelle idrodinamiche degli acquiferi, rappresenta un avanzamento necessario.

La siccità è, com'è noto, un fenomeno che rientra nella naturale variabilità del clima, cui viene generalmente associata una riduzione delle precipitazioni in un dato periodo di tempo, rispetto ad una condizione media di riferimento. Gli effetti di tale stato sono fortemente influenzati dalle concomitanti fluttuazioni di molteplici fattori, tra i quali oltre che le precipitazioni sono determinanti anche la temperatura dell'aria, i venti dominanti, ecc. Per quanto attiene la componente sotterranea del ciclo idrologico, quindi le dinamiche delle risorse idriche sotterranee conseguenti alla ricarica degli acquiferi, gli effetti indotti dalla riduzione delle precipitazioni sono amplificati dall'evapotraspirazione che è a comportamento non lineare, in quanto dipendente dalla disponibilità delle riserve idriche invase nel suolo e dalla temperatura dell'aria.

La variabilità del clima è stata posta recentemente all'attenzione dell'opinione pubblica mondiale sia perché causata principalmente dalle emissioni antropiche di gas-serra e sia perché ha importanti ripercussioni sul sistema socio-economico. L'esame delle serie storiche dei parametri meteo-climatici nelle diverse regioni climatiche del nostro pianeta ha dimostrato l'esistenza di cambiamenti in atto sul clima, sempre più rapidi soprattutto nell'ultimo secolo. Tali cambiamenti sono segnalati nella letteratura specifica da numerosi studi e ricerche, che, seppure con approcci diversi, hanno evidenziato la variabilità a scala pluriennale dei parametri meteo-climatici *s.l.*. Si passa così dall'esame dei dati di temperatura dell'aria e di precipitazione, in taluni casi con particolare riferimento agli eventi estremi, all'analisi delle condizioni di avanzamento-recessione dei ghiacciai, come anche alle modalità di circolazione oceanica ed atmosferica (IPCC, 2001). Gli studi in questo settore sono arrivati fino alla modellazione di differen-

contrast the drought effects in the Mediterranean areas.

**KEYWORDS** *Southern Italy, climatic variability, drought, aquifer recharge, North Atlantic Oscillation (NAO)*

## INTRODUCTION

Water supply and its distribution are key problems in many European countries and more than ever in Italy due to the long-lasting periods of drought, which have occurred especially since the end of the 80s, inducing a general decrease of spring discharges and piezometric levels too. On this subject relevant guidelines and laws about protection and management of groundwater resources (D. Lgs 152/99 and D.Lgs 152/2006) have been issued, but further improvements are needed to properly manage the natural variability of groundwater resources. In particular, aspects related to the interactions between climate and variability of groundwater resources have to be focused.

As known, drought can be considered a phase of the natural climate variability. In general it characterizes a period of deficient rainfall, if compared to a reference mean value that may extend over an indefinite number of days. The occurrence of this condition depends on simultaneous fluctuations of a number of climate factors, e.g. rainfall, air temperature, dominant winds, etc. Effects of rainfall decrease on aquifer recharge, and therefore on groundwater resources, are also amplified by the evapotranspiration process, characterized by a non-linear behaviour and depending above all on soil moisture availability besides of air temperature.

At the present the climate variability has been evidenced by mass-media as a global problem, caused mainly by the anthropogenic emission of greenhouse gases and highly characterised by dramatic social and economical impacts. The analysis of hydrological time-series in several climatic zones allowed the international scientific community to recognise the actual global climate changes and their acceleration in the last century. A review of the specific literature shows a large number of studies and researches that outline, even if with different approaches, relevant changes of many climatic parameters. So the analysis of air temperature and precipitation data, sometimes with particular reference to the extreme events, and the assessment of the glacier advance-decline or of the oceanic and atmospheric circulation pattern (IPCC, 2001) can be recognized in the literature. Different scenarios of climatic evolution in the medium to long term have been recently outlined for the Mediterranean area simulating the effects of CO<sub>2</sub> artificial pollution by means of Global Circulation Models (GCMs) (RÄISÄNEN *et alii*, 2004).

Starting from the abovementioned considerations, the present study is aimed at outlining climate trends in Southern Italy approx-

ti scenari di evoluzione climatica a medio-lungo termine, basati su modelli di circolazione globale dell'atmosfera (GCMs) e sulla simulazione degli effetti di differenti quantitativi di CO<sub>2</sub> immessi artificialmente nell'atmosfera. Tali scenari sono stati recentemente prospettati anche per l'area mediterranea (RÄISÄNEN *et alii*, 2004).

Partendo dalle suddette considerazioni, al fine di accertare le tendenze evolutive dei caratteri climatici nell'Italia meridionale nell'ultimo secolo, e le corrispondenti ripercussioni sulla variabilità delle risorse idriche sotterranee, sono state analizzate le serie storiche dei dati pluviometrici e termometrici rilevati in stazioni meteorologiche dislocate su un'area campione, approssimativamente coincidente con la regione Campania, ritenuta rappresentativa dell'intero territorio per il suo assetto geografico ed idrogeologico.

Per caratterizzare i diversi cicli naturali di medio e lungo periodo, le serie storiche sono state esaminate con approcci articolati su diverse scale spaziali, combinando informazioni idrogeologiche specifiche di un'area campione e fenomeni naturali, responsabili di cambiamenti climatici a scala continentale.

#### ANALISI DELLA VARIABILITÀ CLIMATICA IN ITALIA MERIDIONALE

In questo lavoro, l'attività di ricerca è stata orientata all'analisi dell'evoluzione delle caratteristiche climatiche dell'Italia meridionale, facendo riferimento ai parametri (precipitazioni e temperature) che maggiormente condizionano la ricarica degli acquiferi. A tale scopo sono state considerate 18 stazioni pluviometriche (DE VITA, 2001), gestite dall'ex Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale in Campania (Compartimento di Napoli). La scelta delle stazioni (Cusano Mutri, Pescosannita, Sessa Aurunca, Caiazzo, Caserta, Altavilla Irpina, Torella dei Lombardi, Montevergine, Napoli Istituto di Fisica Terrestre, Palma Campania, Muro Lucano, Sorrento, Nocera Inferiore, Eboli, Sant'Angelo a Fasanella, Castellabate, Gioi Cilento e Morigerati) è stata basata sulla continuità temporale di registrazione, oltre che sull'omogenea distribuzione sul territorio, e quindi sulla rappresentatività nei differenti contesti orografici (Fig. 1). Il periodo cui è stata riferita l'analisi è quello massimo consentito dalle pubblicazioni dei dati a cura dell'ex Servizio Idrografico (1921-1999). In maniera analoga alle precipitazioni, applicando lo stesso criterio di continuità temporale e di omogenea distribuzione spaziale, sono state identificate nove stazioni termometriche distribuite sul territorio della Campania (Gaeta, Atina, Ariano Irpino, Avellino, Montevergine, Napoli, Scafati, Capaccio e Morigerati). Il minore numero di stazioni termometriche riflette la minore densità della rete di monitoraggio, rispetto a quella delle precipitazioni. Ciò tuttavia è giustificato dalla minore variabilità spaziale delle temperature, che, com'è noto, è principalmente dipendente dall'altitudine.

Al fine di rilevare l'esistenza di un *trend* climatico a scala regionale, l'elaborazione dei dati è stata rivolta alla stima di un indice rappresentativo delle anomalie degli apporti pluviometrici annuali, in grado di minimizzare le variazioni connesse a situazioni locali.

imamente in the last century, and the assessing of the effects of climate changes on groundwater resources. It is based on the review of precipitation and air temperature data, recorded by a monitoring network spread on a territory approximately correspondent to the Campania region, which has been globally considered as a test site area, representative of Southern Italy territory for geographical and hydrogeological characters.

In order to characterize the different natural cycles in the medium and long term, hydrological time-series have been analysed with reference to different spatial scales, thus combining hydrogeological information, specific for a sample area, and natural phenomena, the cause of climate changes on a continental scale.

#### ANALYSIS OF CLIMATE VARIABILITY IN SOUTHERN ITALY

In the present paper, the research has been focused on the assessment of the temporal evolution of the climate in Southern Italy. The approach is based on the consistent review of the basic parameters, temperature and precipitation that govern the aquifer recharge. For such a purpose, 18 rain gauge stations, monitored by the ex-Hydrographic and Tidal National Service (Department of Naples), have been considered (DE VITA, 2001). The selection of the stations (Cusano Mutri, Pescosannita, Sessa Aurunca, Caiazzo, Caserta, Altavilla Irpina, Torella dei Lombardi, Montevergine, Napoli Istituto di Fisica Terrestre, Palma Campania, Muro Lucano, Sorrento, Nocera Inferiore, Eboli, Sant'Angelo a Fasanella, Castellabate, Gioi Cilento and Morigerati) has been based on the temporal continuity of the record, and on the homogeneous distribution over the territory as well as on the representativity of the various orographic contexts (Fig. 1). The reference period (1921-1999) has been set depending on the availability of publications edited by the ex-Hydrographic Service.

Similarly to the precipitation time series, applying the same criterion of the temporal continuity of records and of the homogeneous distribution over the territory, 9 thermometric stations (Gaeta, Atina, Ariano Irpino, Avellino, Montevergine, Napoli, Scafati, Capaccio and Morigerati) located in the Campania region have been recognized. The smaller number of stations reflects the sparser density of the air temperature monitoring network due to the less spatial variability of air temperature, depending mainly on the altitude.

The assessment of a climate trend on the regional scale has been performed by the definition of an index representative of the annual anomalous precipitation conditions of the region, which is able to minimize variations due to local factors. For each rain gauge station

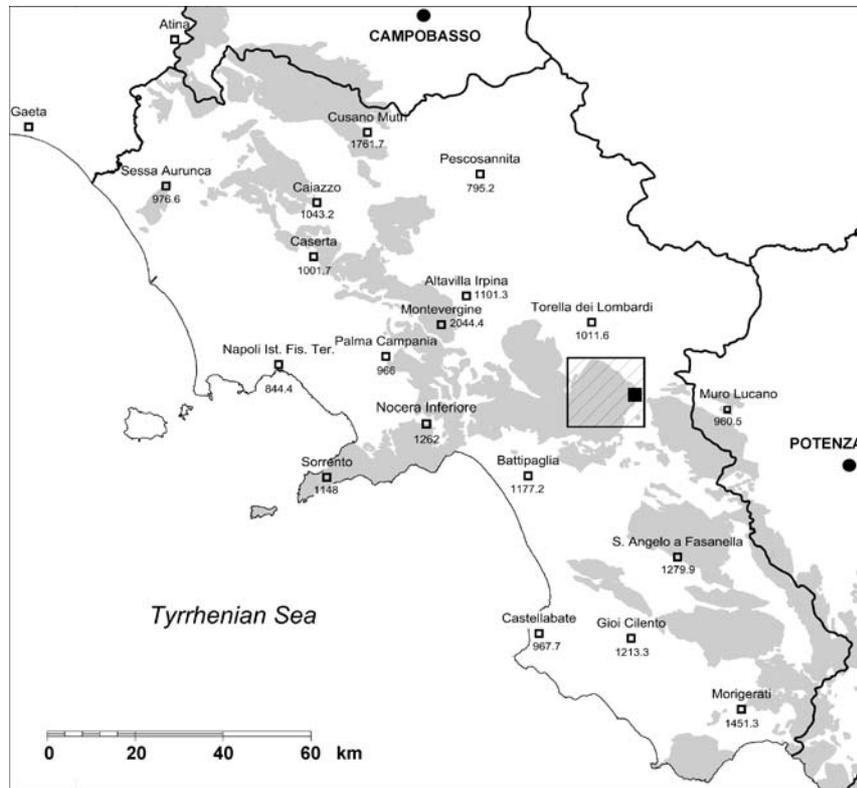


Fig. 1 - Ubicazione delle stazioni pluviometriche e/o termometriche utilizzate nelle analisi. Le aree in grigio rappresentano le unità idrogeologiche carbonatiche, di cui quella racchiusa nel rettangolo ombreggiato è il Monte Cervialto alla quale afferisce la sorgente Sanità di Caposele (AV). Per ciascuna stazione pluviometrica sono stati anche evidenziati i valori medi annui delle precipitazioni (mm) calcolati per il periodo analizzato (1921-1999)  
 - Location of the rain gauge and air temperature monitoring stations. The grey areas are the carbonate hydrogeological units; the shaded area includes the carbonate hydrogeological unit of the Mount Cervialto. For each rain gauge station mean annual values of precipitation (mm) calculated for the reference period have also been shown

Pertanto, per ciascuna stazione pluviometrica è stato stimato l'indice di precipitazione annua ( $P_{mi}$ ), identificato nella differenza tra la precipitazione di ciascun anno della serie ( $P_i$ ) ed il valore medio della serie storica ( $\bar{P}$ ), normalizzata rispetto allo stesso valore medio ( $\bar{P}$ ).

$$P_{mi} (\%) = (P_i - \bar{P}) / \bar{P}$$

dove:

$P_i$  = pioggia della stazione per l'anno i-esimo;

$\bar{P}$  = valore medio della serie storica della stazione;

$P_{mi}$  = indice di precipitazione media per l'anno i-esimo.

La stima del valore medio degli indici ricavati per le 18 serie storiche, per ciascun anno della serie, ha quindi consentito di definire l'indice di precipitazione media ( $P_m$ ) (DE VITA, 2001). La serie storica del suddetto indice ( $P_m$ ) mostra nel periodo 1921-1999 un generale *trend* in diminuzione, se analizzato con un modello lineare di variazione, in accordo a quanto già evidenziato in Italia meridionale da COTECCHIA *et alii* (2003). Tuttavia, in sovrapposizione a questa tendenza è possibile identificare una ciclicità complessa caratterizzata da oscillazioni periodiche attorno al valore medio. Le variazioni attorno al valore medio oscillano tra -25% e +28%, nell'intervallo di

the annual precipitation index ( $P_{mi}$ ) has been calculated as the difference between annual precipitation ( $P_i$ ) and the average value of the whole time-series ( $\bar{P}$ ), normalised with respect to the same average value ( $\bar{P}$ ).

$$P_{mi} (\%) = (P_i - \bar{P}) / \bar{P}$$

where:

$P_i$  = annual precipitation at the rain gauge station in the i-th year;

$\bar{P}$  = mean value of the time series;

$P_{mi}$  = mean precipitation index of the i-th year.

The  $P_{mi}$  mean value of the 18 series, for each year of the time series, represents the mean precipitation index ( $P_m$ ) (DE VITA, 2001).

By the time series of the above mentioned index ( $P_m$ ), with reference to the observation period (1921-1999), it can be recognized a general decreasing trend of precipitation, if analysed with a linear model, as well as pointed out by COTECCHIA *et alii* (2003). Nevertheless it can be identified a complex periodicity superimposed to the abovementioned general trend. The variations around the mean value range between -25% and +28% in the probability interval between 5% and 95% (significance level 10%). In particular, since

probabilità compreso tra il 5% ed il 95% (livello di significatività del 10%). In particolare, a partire dal 1989 si osservano i valori annui più bassi dell'intero periodo di osservazione, sebbene valori comparabili siano ascrivibili anche al 1932 ed al 1946 (Fig. 2).

Nel lungo periodo la ciclicità è ben dimostrabile mediante un filtraggio operato con la media mobile ad undici anni, calcolata rispetto al valore centrale del periodo di riferimento, il sesto, al fine di ricavare una serie filtrata in fase con i dati della serie storica. In questa maniera sono rispettivamente identificabili due fasi di massimi relativi, corrispondenti agli anni 1930-1944 e 1958-1978, e tre fasi di minimi relativi, corrispondenti agli anni precedenti al 1930, al periodo 1944-1958 ed agli anni successivi al 1980 (Fig. 2).

1989 the lowest annual values of the period have been registered, even if comparable values can be also recognised in 1932 and in 1946 (Fig. 2).

On the long term, the periodicity can be well shown by an 11-years moving average filtering of the precipitation index ( $P_m$ ) time series. Specifically, the moving average has been calculated with reference to the central year of the 11-years moving dataset, the sixth, in order to achieve a filtered series in phase with the precipitation time series data. The fluctuations can be identified in the two relative maxima, related to the years 1930-1944 and 1958-1978, and in the relative minima, related to years previous to the 1930, 1944-1958 and following the 1980 (Fig. 2).

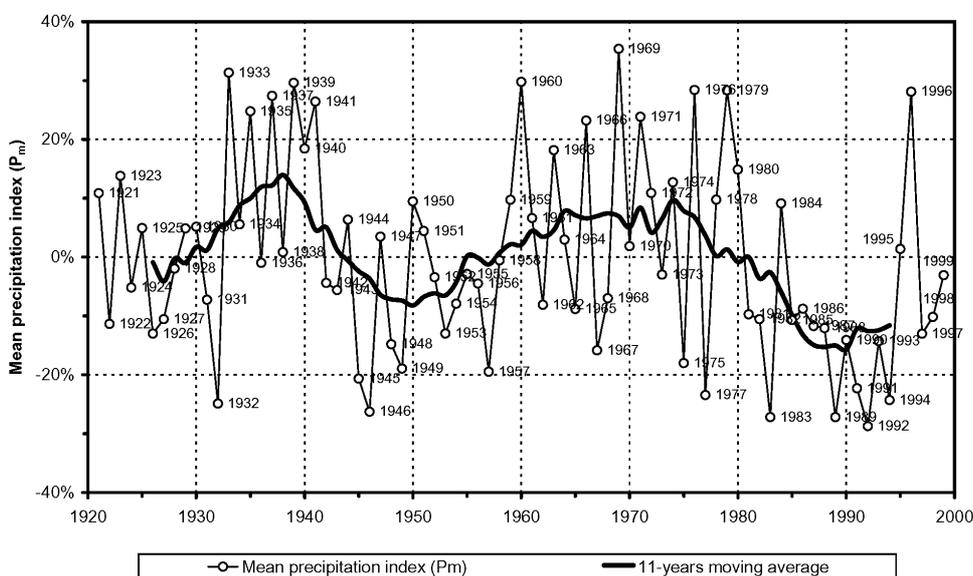


Fig. 2 - Variazione dell'indice di precipitazione media ( $P_m$ ) per la Campania (1921-1999)  
- Variation of mean precipitation index ( $P_m$ ) for the Campania region (1921-1999)

In maniera analoga alle precipitazioni, dalle serie storiche termometriche (1921-1999) è stato stimato l'indice di temperatura media dell'aria ( $T_m$ ), valido a scala regionale e rappresentativo delle fluttuazioni della temperatura dell'aria rispetto al valore medio delle serie storiche (Fig. 3). Anche in questo caso, pur esistendo un apparente trend all'incremento della temperatura media dell'aria, si osservano fluttuazioni attorno al valore medio della serie storica contraddistinte da una complessa ciclicità pluriennale. Gli ultimi anni, in particolare dal 1985, sono comunque caratterizzati da valori di temperatura tra i più alti della serie storica.

Al fine di avere un'analisi del trend depurata dall'effetto del riscaldamento dei centri urbani, è stata considerata in particolare modo la serie storica di temperatura dell'aria della stazione di Montevergine (AV), la più alta tra le varie stazioni termometriche (1.200 m s.l.m.), ritenuta la più rappresentativa per la distanza dai centri urbani. Con riferimento ai valori medi, massimi e minimi gior-

In the same way and with reference to the identical observation period (1921-1999), the mean air temperature index ( $T_m$ ) has been calculated. The index shows on the regional scale the natural fluctuations of air temperatures with respect to the mean value (Fig. 3). Also in this case, even if an apparent increasing trend of air temperature can be observed, a complex decadal variability around the mean value can be clearly recognised. The last years, particularly since 1985, are among the highest of the whole time series.

To analyse the air temperature trend refined by urban warming, it has been considered air temperature time series of the Montevergine station that is the highest (1,200 m a.s.l.) among the other thermometric stations and the most representative for the distance from the urban centres. With regard to the mean, maximum and minimum daily values, averaged in the year, it is possible to point out in the recording period a general increase of the mean daily temperature, an increase of the minimum daily temperature

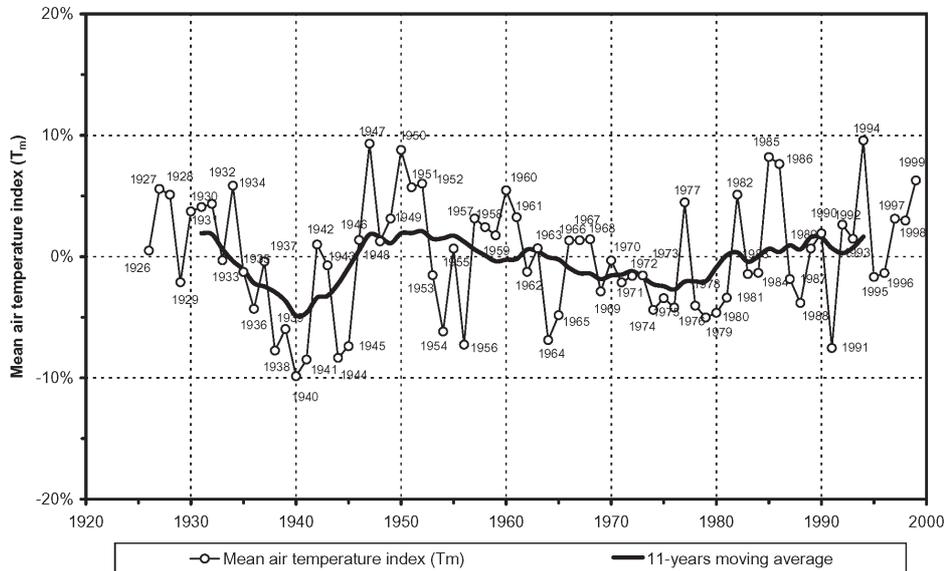


Fig. 3 - Variazione dell'indice di temperatura media dell'aria ( $T_m$ ) per la Campania (1926-1999)  
 - Variations of index of the mean air temperature ( $T_m$ ) for the Campania region (1926-1999)

nalieri, rispettivamente stimati in media annua, si evidenzia nel periodo di registrazione (1921-1999) un generale incremento dei valori medi e minimi giornalieri ed, apparentemente, una decrescita dei valori massimi giornalieri. In particolare, appare apprezzabile, con riferimento ad un modello di variazione lineare ed all'intero periodo di osservazione, un incremento del valore medio giornaliero pari a  $0.7^{\circ}\text{C}$ , un incremento del valore minimo pari a circa  $2.0^{\circ}\text{C}$  ed un complessivo decremento dei valori massimi pari a circa  $0.5^{\circ}\text{C}$  (Fig. 4). I test di significatività statistica del coefficiente di correlazione del modello lineare non risultano essere verificati solo per la tendenza dei valori massimi (livello di significatività del 10%). Queste osservazioni appaiono confermare l'esistenza di un generale incremento delle temperature dell'aria, sebbene si rilevi anche in questo caso esistere una ciclicità pluriennale complessa, in sovrapposizione alla tendenza di base (Fig. 4).

#### VARIABILITÀ CLIMATICA IN CAMPANIA E L'OSCILLAZIONE DEL NORD ATLANTICO (NAO)

L'analisi delle più significative serie termo-pluviometriche del territorio campano evidenzia l'esistenza, approssimativamente nell'ultimo secolo, di variabilità pluriennali che dimostrano l'esistenza di cambiamenti climatici. D'altronde, i fenomeni che controllano il clima, conseguenti all'interazione delle complesse ed articolate dinamiche naturali, cui solo recentemente si è aggiunta la componente antropica, non sono caratteristiche immutabili, essendo influenzate, soprattutto sul lungo periodo da fenomeni astronomici (cicli orbitali terrestri), così come chiaramente testimoniano le variazioni climatiche del Quaternario. Alla scala secolare e decennale, la variabilità del clima è resa più complessa dalle modalità di circolazione atmosferi-

and an apparent decrease of the maximum daily temperature. Specifically for this case it is possible to evaluate, with reference to a linear model, a global increase of the mean daily temperature of about  $0.7^{\circ}\text{C}$ , a global increase of the minimum daily temperature of about  $2^{\circ}\text{C}$  and a decrease of the maximum ones of about  $0.5^{\circ}\text{C}$  (Fig. 4). The tests of the correlation coefficient for the linear model fail only for the maximum time series (10% significance level). The aforesaid trends seem to confirm the existence of a progressive increase in air temperature values even if, also in this case, it is possible to recognise a complex cyclic decadal variability (Fig. 4).

#### CLIMATIC VARIABILITY IN THE CAMPANIA REGION AND THE NORTH ATLANTIC OSCILLATION (NAO)

The analysis of the most representative precipitation and air temperature time series data, gathered in the territory of the Campania region, allows the identification of a decadal climatic variability, about in the last century, in a sample area of Southern Italy. As known, climatic characteristics of a region can be generally attributed to the complex interactions of changing natural phenomena, to which the anthropogenic component has been added only in recent times. Climate cannot be considered stable, as it clearly appears by the strong long term climatic variations occurred during the Quaternary and caused by astronomical phenomena (terrestrial orbital cycles).

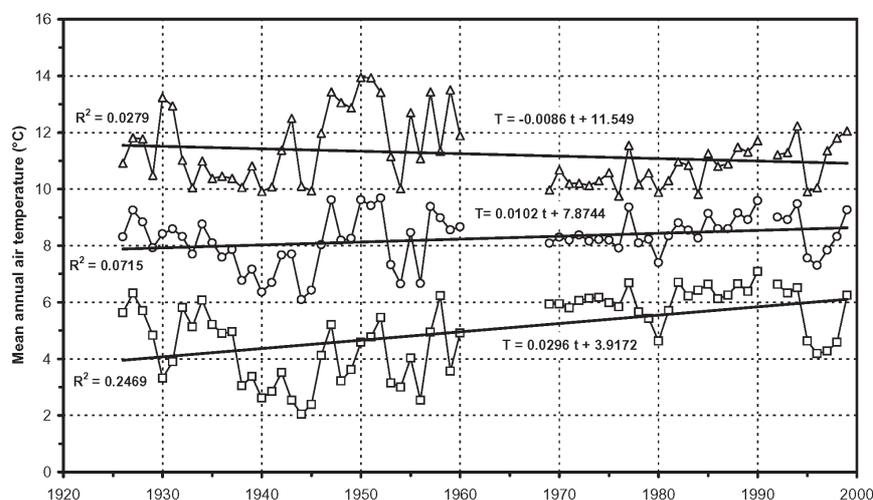


Fig. 4 - Andamento delle temperature giornaliere medie e delle temperature minime e massime, rispettivamente stimate come valori medi annui, osservate alla stazione termometrica di Montevergine dal 1926 al 1999. La serie storica è incompleta nel periodo 1961-1968

- Trends of the daily minimum, mean and maximum values, averaged in the year, observed at the Montevergine station from 1926 to 1999. The time series is incomplete in the period 1961-1968

ca che sono influenzate soprattutto dalla capacità di modulazione e di distribuzione dell'energia solare esercitata dalla circolazione oceanica e dall'attività solare. In altri termini, il sistema climatico terrestre può essere considerato come una serie di sottosistemi, con complessità spaziali e temporali differenti, tra loro interagenti, che, sollecitato da cause esterne (cicli orbitali e radiazione solare) generano nel tempo variabilità climatiche ad andamento ciclico complesso. Pertanto, la distribuzione dei parametri climatici a scala annuale e pluriennale muta in funzione dello stato dei diversi sottosistemi, fortemente condizionati dalla circolazione oceanica. Tra questi, i più rilevanti fenomeni ciclici di interazione oceano-atmosfera sono l'ENSO, ovvero "El Nino" (BJERKNES, 1969), dal quale dipendono la temperatura del mare ed i campi di pressione atmosferica nell'oceano Pacifico (nella zona compresa tra le coste del Cile e le isole di Papua), e l'Oscillazione del Nord Atlantico (NAO) (WALKER, 1924; HURREL, 2003) che controlla il clima nell'Atlantico settentrionale e nel Mediterraneo.

Poiché quest'ultimo fenomeno (NAO) è responsabile delle condizioni meteorologiche nell'emisfero settentrionale, dall'America nord-occidentale all'Europa, e quindi nell'area mediterranea, nel presente lavoro è stata esaminata la sua influenza sulle variazioni climatiche nell'Italia meridionale. Tale ipotesi di lavoro è scaturita dall'osservazione fattache le variazioni cicliche di lungo periodo delle precipitazioni, riscontrate a scala regionale sul territorio della Campania, sono imputabili, già ad un'analisi preliminare, più che a fenomeni casuali, a cambiamenti climatici con ciclicità complessa, riconducibili, a scala continentale, alle aree di provenienza delle masse di aria umida che condizionano il regime pluviometrico lungo la costa tirrenica, ovvero all'Oceano Atlantico.

Dagli studi sulla circolazione atmosferica globale, è noto che

On the secular and decadal scales, climatic variability becomes more complex owing to the global atmospheric circulation modes that are influenced above all by the modulation effect acted by oceanic water bodies on the solar energy redistribution and by the solar activity itself. Therefore the temporal variability of climate in the terrestrial climatic system is the result of the interaction of a number of subsystems on which the influence of external causes (terrestrial orbital cycles and solar activity) generate complex periodic variations. Therefore, the climatic parameters, which account for the solar energy redistribution, change with seasonal and decadal periodicity according to the status of the different subsystems, among them the oceanic circulation is a key factor. The most relevant coupled oceanic-atmospheric phenomena are the ENSO, namely "El Nino" (BJERKNES, 1969), on which the ocean temperature and the barometric pressure fields depend in the Pacific Ocean (in the area between the Chile's coasts and the Papua Islands) and the North Atlantic Oscillation (NAO) (WALKER, 1924; HURREL, 2003) that controls climate characteristics in the northern Atlantic sector and in the Mediterranean.

In this paper we analyze the influence of the latter coupled oceanic-atmospheric phenomenon (NAO) on the decadal climate variability in Southern Italy, because it largely controls the climatic characteristics in the northern hemisphere, from northwestern America to the Europe, thus up to the Mediterranean area. In fact, the decadal variability of climatic characteristics recognized in the Campania region seems to be not casual but influenced by complex cyclic phenomena, possibly existing on a continental scale, and presumably regarding the areas of origin of the humid air masses that control the atmospheric precipitation regime on the Tyrrhenian coast and therefore chiefly coming from the Atlantic Ocean.

From the studies about the atmospheric circulation on the north-

l'Atlantico settentrionale è interessato da fenomeni ciclici che controllano l'interazione tra le masse liquide e quelle gassose. Tra questi, quello che ha le maggiori ripercussioni sui mutamenti climatici, è l'Oscillazione del Nord Atlantico (NAO) che si manifesta come un'oscillazione a periodicità complessa delle masse atmosferiche tra le Azzorre (alto barometrico) e l'Islanda (basso barometrico). L'Oscillazione del Nord Atlantico è espressa dall'indice NAO, definito dall'anomalia, rispetto alla differenza standard, tra il minimo barometrico dell'Islanda e l'alto barometrico delle Azzorre. Esistono differenti indici NAO (HURRELL, 2003), in relazione alle stazioni meteorologiche considerate ed al periodo dell'anno rispetto al quale viene stimata la differenza standard. Nelle analisi condotte in questo lavoro è stato considerato l'indice invernale basato sulle registrazioni delle stazioni barometriche di Lisbona (Portogallo) e di Stykkisholmur- Reykiavik (Islanda) (HURRELL, 1995; HURRELL & VAN LOON, 1997). L'indice varia di anno in anno con una ciclicità complessa, ma mostra di appartenere alla stessa fase (positiva o negativa) per diversi anni (30÷40 anni) (Fig. 5).

ern Atlantic Ocean it is known that this part of the Ocean is influenced by different cyclic phenomena which control the interaction between liquid and gaseous masses. Among these phenomena the most important, as far as the influence on climatic characteristic of the European continent is concerned, is the North Atlantic Oscillation (NAO), which is an oscillation with complex periodicity of the atmospheric masses over the tropical zone of the Azores Islands (barometric high) and Iceland (barometric low). The North Atlantic Oscillation is expressed by the NAO index, which is defined by the barometric anomaly, with respect to the standard difference, between Iceland's barometric low and the Azores's barometric high. Different NAO indexes exist (HURRELL, 2003), depending on the meteorological stations and on the period of the year considered. The present study analyses the winter index of the NAO obtained by the normalized difference of atmospheric pressure at the sea level between Lisbon (Portugal) and Stykkisholmur/Reykjavik (Iceland) (HURRELL, 1995; HURRELL & VAN LOON, 1997). This index varies yearly with a complex periodicity but it belongs to the same phase (positive or negative) for several decades (30÷40 years) (Fig. 5).

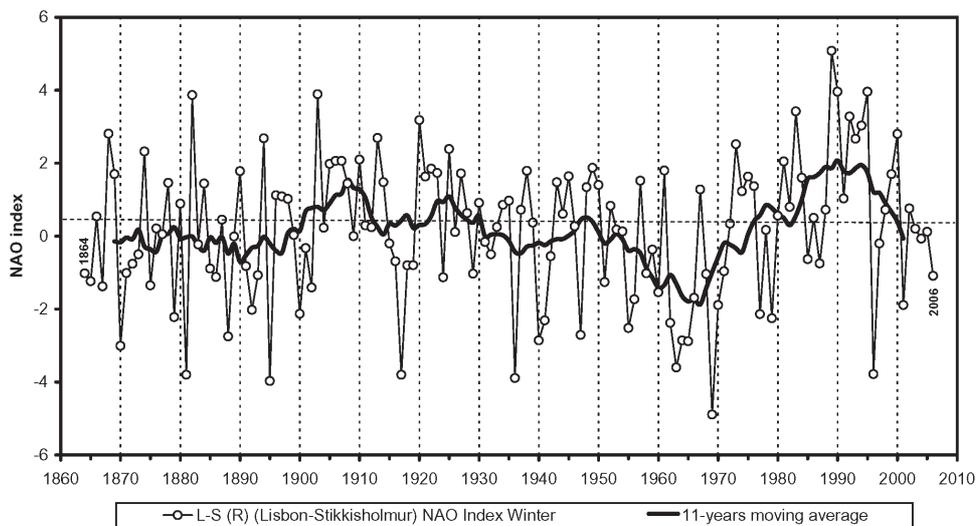


Fig. 5 - Serie storica completa dell'indice NAO invernale (1864-2006) registrato tra le stazioni barometriche di Lisbona (Portogallo) e Stikkisholmur (Islanda) (<http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.html>)  
 - Winter NAO index time series (1864-2006) monitored between Lisbon (Portugal) and Stykkisholmur/Reykjavik (Iceland). Data are available at <http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.html>

Il valore positivo dell'indice NAO indica l'esistenza di un'area di pressione atmosferica maggiore del normale sulla zona tropicale delle Azzorre ed una zona di depressione più accentuata del valore medio in corrispondenza dell'Islanda, quindi complessivamente una differenza barometrica maggiore del valore medio tra i due citati poli. In questi periodi le aree mediterranee e dell'Europa centro-meridionale godono di inverni temperati e poco piovosi, mentre le aree europee settentrionali sono interessate da violente perturbazioni. Invece, il valore negativo dell'indice NAO indica una riduzione

The positive value of the NAO index indicates the existence of an atmospheric pressure greater than the normal value on the tropical zone of the Azores Islands and an atmospheric pressure lower than the normal value on the Iceland, therefore a greater barometric difference between the aforesaid poles. In the positive NAO index period, the Mediterranean and the central-southern areas of Europe have mild winters with poorer atmospheric precipitations while the northern parts of the European continent are interested by intense perturbations. Instead, the negative value of the NAO index indicates an

anomala della differenza di pressione atmosferica tra le aree tropicali delle Azzorre ed il minimo barometrico dell'Islanda. In questo caso, il ridotto gradiente barometrico non consente lo sviluppo di violente perturbazioni nell'Europa settentrionale, ma induce perturbazioni di minore intensità nell'area mediterranea e nell'Europa centro-meridionale, generando in queste aree inverni umidi.

L'Oscillazione del Nord Atlantico è causa di variazioni climatiche da interannuali a decennali nel settore marittimo dell'Atlantico, sia sul continente europeo che americano (BARNSTON & LIVEZEY, 1987). Infatti, essa è ben correlabile con le variazioni climatiche dell'emisfero settentrionale, quindi con le precipitazioni e le temperature dell'aria (HURRELL, 1995). L'influenza di tale fenomeno atmosferico periodico si estende nel continente europeo almeno fino alla Turchia, come dimostra la buona correlazione tra i parametri meteorologici medi di quest'area e l'indice NAO (CULLEN & DE MENOCAL, 1997; TÜRKES & ERLAT, 2005); mentre, nel continente americano, ne è stata riconosciuta l'influenza sulle serie storiche di deflussi fluviali (TOOTLE *et alii*, 2005).

Sulla base delle anzidette conoscenze è stata verificata l'esistenza di correlazione tra la serie storica dell'indice di precipitazione media ( $P_m$ ) e l'indice NAO mediante l'analisi di cross-correlazione. Il massimo valore del coefficiente di correlazione tra le due serie storiche ( $r = -0.408$ ) è stato verificato per un ritardo nullo e con un livello di significatività che supera i test statistici di t-Student e di F-Fisher (Fig. 6). D'altronde il semplice confronto grafico tra le due serie evidenzia, soprattutto dopo il filtraggio con le medie mobili ad 11 anni, una chiara coincidenza di fase ed una corrispondenza dei principali picchi (Fig 7), oltre che una migliore correlazione tra le due serie storiche ( $r = -0.782$ ) (Fig. 6).

La stessa analisi dimostra l'esistenza di una più debole correlazione tra l'indice di temperatura media annua ( $T_m$ ) e l'indice NAO, signifi-

anomalous reduction of the barometric difference between Azores and Iceland. In these cases, the lower barometric gradient does not allow the formation of intense perturbations on the northern Europe but it induces less intense perturbations on the Mediterranean and the central-southern areas of the Europe, giving in these areas humid winters.

The North Atlantic Oscillation causes annual and decadal variations of the climatic parameters in the coastal area of the eastern Atlantic Ocean (BARNSTON & LIVEZEY, 1987). Such a periodic anomaly resulted well correlated with the climatic characteristics of the northern hemisphere, namely with the atmospheric precipitations and with the air temperatures (HURRELL, 1995). The influence of this periodic atmospheric phenomenon extends in the European continent at least as far as Turkey, as it has been demonstrated by the good correlation between mean climatic parameters of this area and the NAO index (CULLEN & DE MENOCAL, 1997; TÜRKES & ERLAT, 2005). On the other hand, in the American continent the influence of the NAO has been identified on decadal variability of streamflows (TOOTLE *et alii*, 2005).

On the basis of the abovementioned understandings we have verified the existence of a correlation between the time series of the mean precipitation index ( $P_m$ ) and NAO one by mean of a cross-correlation analysis. The maximum value of the correlation coefficient between the two time series ( $r = -0.408$ ) has been verified for a zero lag with a high significance level that passes the t-Student and F-Fischer statistical tests (Fig. 6). Furthermore, the 11-years moving average filtering clearly shows a phase correspondence and the coincidence of the principal peaks (Fig 7) besides of a better correlation coefficient between the two filtered time series ( $r = -0.782$ ).

The same analysis exhibits the existence of a weaker correlation between NAO index and the mean air temperature index ( $T_m$ ) that is

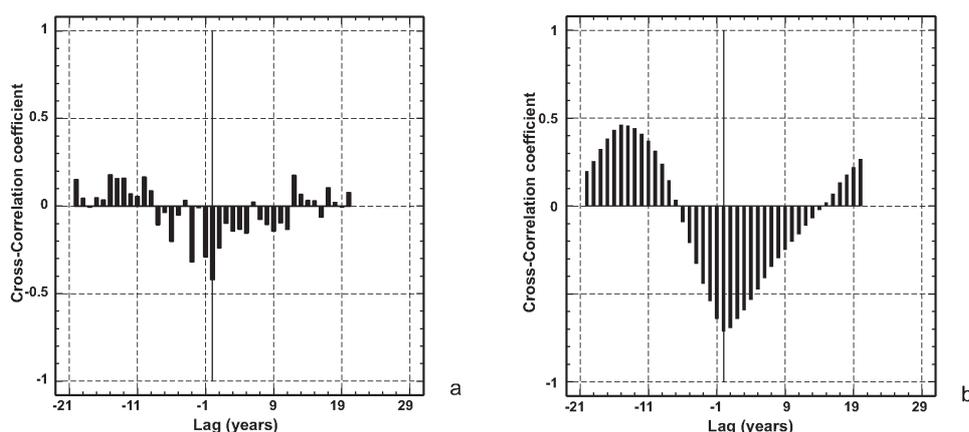


Fig. 6 - Analisi di cross-correlazione tra l'indice NAO e l'indice di precipitazione media ( $P_m$ ) effettuata su: a) serie storiche naturali ( $r = -0.408$ ; Prob. t-Student = 0.019%; Prob. F-Fisher = 0.019%); b) medie mobili a 11 anni ( $r = -0.782$ ; Prob. t-Student < 0.0001%; Prob. F-Fisher < 0.0001%). In quest'ultimo caso la correlazione aumenta grazie al filtraggio che evidenzia la tendenza nel lungo periodo

- Cross-correlation analysis between winter NAO index and the mean precipitation index ( $P_m$ ) carried out on: a) the original time series data ( $r = -0.408$ ; Prob. t-Student = 0.019%; Prob. F-Fisher = 0.019%); b) the respective 11-years moving average ( $r = -0.782$ ; Prob. t-Student < 0.0001%; Prob. F-Fisher < 0.0001%). In the latter case the correlation is higher because of the filtering out of the long-period trend

ficativa, dal punto di vista statistico, solo tra le serie storiche mediate su 11 anni ( $r = 0.278$ ; Prob. t-Student = 2.6%; Prob. F-Fisher = 2.6%).

Da ciò deriva, con riferimento agli ultimi 80 anni, che il pattern di lungo periodo delle precipitazioni e delle temperature in Campania presenti una variabilità caratterizzata da ciclicità complessa, correlabile a fenomeni atmosferici non casuali, in quanto controllati dalle variazioni del gradiente barometrico, esistenti tra l'anticiclone delle Azzorre e la depressione dell'Islanda.

Secondo l'ipotesi proposta, le anomalie meteorologiche registrate negli ultimi decenni, con conseguente decremento delle precipitazioni a partire dall'inizio degli anni '70, sono correlabili al perdurare della fase positiva dell'indice NAO (FIG. 5, 6 e 7). D'altronde, la fase caratterizzata da valori di precipitazione notevolmente inferiori a quello medio, non appare per la prima volta nella serie storica, ma si è manifestata in maniera simile nel periodo compreso tra il 1945 ed il 1955, in corrispondenza del precedente periodo di valori positivi dell'indice NAO. L'esame dei dati pluviometrici più recenti porterebbe ad ipotizzare un cambiamento di fase, coincidente con l'inversione dell'indice NAO, che sembra essere iniziata a partire dalla seconda metà degli anni '90 (Fig. 7).

significant only for the 11-years moving average time series ( $r = 0.278$ ; Prob. t-Student = 2.6%; Prob. F-Fisher = 2.6%).

The abovementioned observations reveal that the long term pattern of the precipitation and air temperature time series show in the last 80 years a complex periodicity in the Campania region, which is not correlated to casual atmospheric phenomena but is controlled by the variations of the barometric gradient between the Azores's anticyclone and the Iceland's barometric low.

According to the proposed hypothesis, it is evident that the meteorological anomalies recorded in the last decades, characterized by precipitation decrease and air temperature increase since the 70s can be linked to the lasting of the NAO index positive value (FIGS. 5, 6 and 7). In addition, the phase with precipitation less than the mean value does not appear for the first time in the time series, but it was present similarly in the period between 1945 and 1955. This was, indeed, when the NAO index was positive. Therefore the analysis of the climatic time series would lead to the forecast of a change of the actual trend due to an inversion of the NAO index starting from the second half of the 90s (Fig. 7).

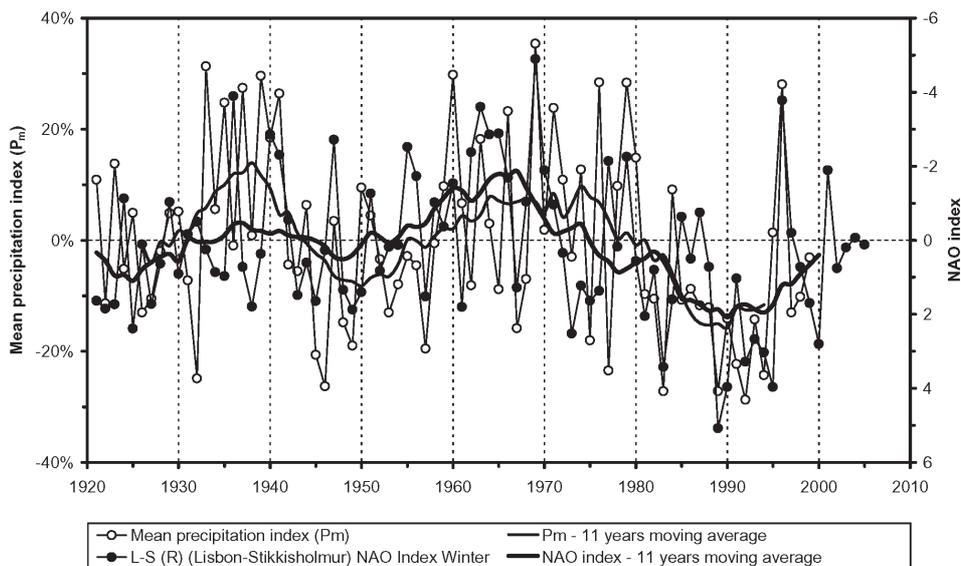


Fig. 7 - Confronto tra l'indice NAO invernale e l'indice di precipitazione media (Pm) per la Campania (1921-1999)  
- Comparison between the winter NAO index and the mean precipitation index (Pm) for the Campania region (1921-1999)

### LA VARIABILITÀ PLURIENNALE DELLE RISORSE IDRICHE SOTTERRANEE

L'analisi fin qui esplicita dimostra, su scala pluriennale, l'influenza dell'Oscillazione del Nord Atlantico sugli afflussi meteorici nel territorio della Campania, e, verosimilmente, in tutto il resto dell'Italia meridionale. Per verificare eventuali analoghe ripercussioni anche sulla ricarica degli acquiferi, applicando alle serie storiche pluviometriche e termometriche la formula di TURC (1954), è stata stimata per ciascuna delle 18 stazioni l'evapotraspirazione annua ( $E_{Ti}$ ), quindi un

### THE DECADAL VARIABILITY OF GROUNDWATER RESOURCES

The analysis previously discussed shows the influence, on the decadal scale, of the North Atlantic Oscillation on the precipitations in the Campania region and likely in the rest of the territory of Southern Italy. From the latter it can be inferred that aquifer recharge could undergo the same long term variability. Starting from this hypothesis, we have estimated the annual evapotranspiration for each rain gauge stations by applying the TURC formula (1954) to the pre-

indice di precipitazione efficace annuo, rappresentativo della differenza standard, rispetto al valore medio, delle precipitazioni efficaci annue ( $P_{mei} = P_i - Er_i$ ). Per le stazioni pluviometriche non provviste di termometro, i dati termometrici sono stati estrapolati mediante leggi di variazione lineare della temperatura dell'aria con la quota, determinate per ciascun anno della serie storica. È stato poi ricavato, per ciascun anno della serie, l'indice di precipitazione efficace media ( $P_{me}$ ), come media degli indici ottenuti per le 18 stazioni. La serie storica del suddetto indice mostra, in maniera ancora più marcata della corrispondente serie dell'indice di precipitazione media ( $P_m$ ), l'esistenza di fluttuazioni attorno al valore medio, con ciclicità pluriennali correlate all'alternarsi delle fasi dell'indice NAO (Fig. 8). In dettaglio, l'indice di precipitazione efficace media ( $P_{me}$ ) varia tra -47% e +66% nell'intervallo di probabilità compreso tra il 5% ed il 95% (livello di significatività del 10%), confermando l'effetto di amplificazione dovuto al comportamento non lineare dell'evapotraspirazione reale.

precipitation and air temperature time series. According to the above-mentioned criterion we have estimated for the 18 rain gauge stations the effective precipitation index, calculated as the standard difference, respect to the average value of the whole time series, of the annual effective precipitation ( $P_{mei} = P_i - Er_i$ ). For each year of the series and for the rain gauge stations unprovided of thermometric recording, the air temperature data have been extrapolated by means of empirical linear models of air temperature-altitude. Then the mean effective precipitation index ( $P_{me}$ ) has been calculated as the average of the 18 stations. The  $P_{me}$  time series shows, more clearly than the  $P_m$  one, the existence of stronger decadal fluctuations around the average value, which are well correlated with the NAO index (Fig. 8). In detail, the mean effective precipitation index ( $P_{me}$ ) ranges between -47% and +66%, in the probability interval from 5% to 95% (10% significance level), confirming the amplification effect due to the non-linear behavior of the actual evapotranspiration.

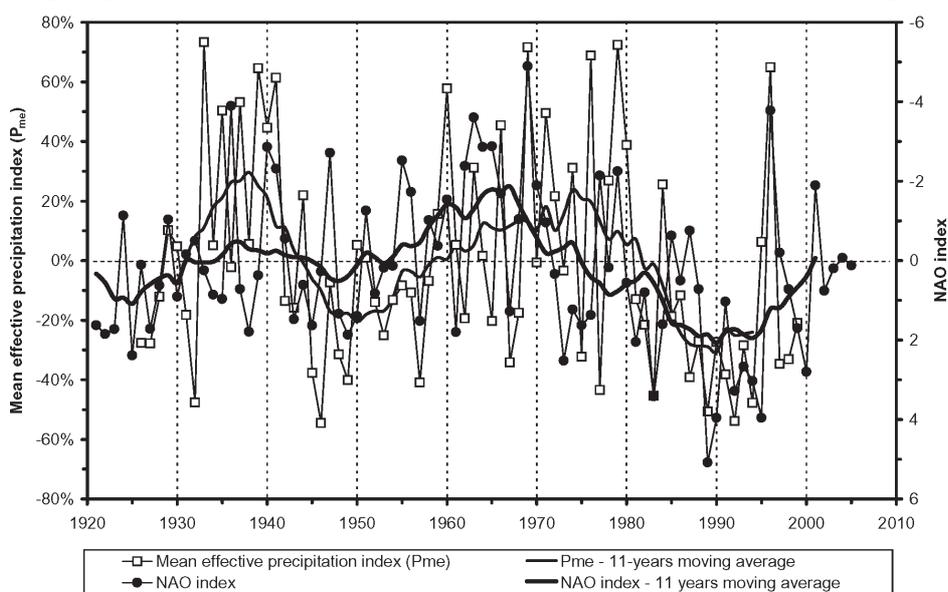


Fig. 8 - Confronto tra l'indice NAO invernale e l'indice di precipitazione efficace media (Pme) per la Campania (1926-1999)  
- Comparison between the winter NAO index and the mean effective precipitation index (Pme) in the Campania region (1926-1999)

D'altra parte i fenomeni di ricarica degli acquiferi dipendono anche dalle caratteristiche dei singoli eventi pluviometrici, soprattutto in termini di entità, durata ed intensità degli stessi. Proprio quest'ultimo parametro, dal quale dipende la ripartizione in infiltrazione e deflusso superficiale, diviene teoricamente non trascurabile soprattutto per l'apparente incremento dell'intensità media delle precipitazioni, osservato a partire dagli anni '80 ed attribuito alla "tropicalizzazione" del regime pluviometrico (MAZZARELLA, 1999). Tuttavia, pur non considerando tale problematica specifica, certamente influente ad una scala temporale più breve di quella utilizzata nelle analisi condotte in questo lavoro, è stata valutata a scala pluriennale l'incidenza dell'Oscillazione del Nord Atlantico sul fenomeno della ricari-

As known, the aquifer recharge phenomena depend also by the characteristics of the single rainfall events, i.e. on their amount, duration and intensity. The latter parameter, which accounts for the partition in infiltration and runoff, theoretically is not negligible, especially on the short time scale and considering the incoming tropical character of the precipitations in the last decades (MAZZARELLA, 1999) that accounts for the increasing in the intensity of rainfall events. But, even if neglecting the influence of the rainfall intensity on the aquifer recharge, which can be analysed only on a short term temporal scale, we have evaluated the NAO influence on the variability of the decadal recharge of the most important aquifers in the studied area, recognisable in the carbon-

ca degli acquiferi. Nell'area di studio, i più rappresentativi tra questi, ai fini della stima dei processi di ricarica, sono soprattutto quelli carbonatici, sia per l'elevata produttività e sia per le specifiche condizioni idrogeologiche che favoriscono l'infiltrazione, e quindi il deflusso idrico sotterraneo, a discapito del ruscellamento superficiale. Da ciò consegue che questi acquiferi costituiscono le principali fonti di approvvigionamento idrico potabile nell'Italia centro-meridionale sia per la grande potenzialità annua, attribuibile agli elevati coefficienti di infiltrazione potenziale (prossimi al 100%), e sia per la concentrazione del recapito in grandi sorgenti basali (CELICO *et alii*, 2000).

Nel caso specifico è stata analizzata, quale bacino campione, l'unità idrogeologica del massiccio carbonatico del Monte Cervialto (Fig. 1). La falda di base di detta unità carbonatica, perfettamente isolata dalle strutture idrogeologiche adiacenti a minore permeabilità (CELICO, 1978; 1983), ha un unico recapito rappresentato dalla sorgente Sanità di Caposele (AV) (420 m s.l.m.) con portata media di circa 4.0 m<sup>3</sup>/s. Tale sorgente basale costituisce notoriamente la principale fonte di approvvigionamento idrico dell'Acquedotto Pugliese per la cui gestione le portate sorgive sono state registrate con sistematicità quindicimale fin dal 1920, e con monitoraggio giornaliero dal 1964.

La serie storica delle portate sorgive (1920-2005) è stata trattata in maniera analoga a quella dei dati pluviometrici e termometrici, quindi stimando un indice di portata media annua ( $Q_m$ ), rappresentato dalla differenza standard della portata media annua rispetto al valore medio dell'intera serie storica. Si è così riscontrato, anche per le portate sorgive, una ciclicità pluriennale complessa del tutto correlabile con le fluttuazioni delle precipitazioni e quindi dell'indice NAO. L'analisi di cross-correlazione evidenzia il valore più elevato del coefficiente di correlazione ( $r = -0.530$ ) per un ritardo nullo e, per le stesse serie storiche filtrate con la media mobile ad 11 anni, una correlazione migliore ( $r = -0.710$ ). Per entrambe le analisi, i *test* di significatività statistica del coefficiente di correlazione sono ampiamente superati (Fig. 9). La buona correlazione tra le due serie storiche è altresì apprezzabile anche dal semplice confronto grafico tra le medie mobili ad 11 anni che mostra una generale coincidenza di fase ed una corrispondenza dei principali picchi (Fig. 10). Da tale confronto è inoltre possibile evidenziare, tra il 1980 ed il 1996, una sensibile divergenza tra le medie mobili undecennali che può essere attribuita agli anomali incrementi di portata della sorgente verificatisi in seguito all'evento sismico del 23 novembre 1980 (CELICO, 1981; CELICO & MATTIA, 2002).

È stato ritenuto utile dimostrare la suddetta correlazione con l'indice NAO anche considerando i valori massimi, medi e minimi annuali delle portate della sorgente Sanità di Caposele (Fig. 11). In particolare, le portate minime annuali della sorgente sono quelle di maggiore rilevanza per la gestione del sistema acquedottistico poiché, essendo rappresentative della variazione delle riserve regolatrici, esse sono ancora più indicative della condizione di ricarica dell'acquifero.

Con riferimento al periodo di osservazione (1920-2005), si evince una correlazione di tipo non lineare tra il valore mediato su undici anni delle portate massime, medie e minime annuali ed il corrispon-

ate ones. This kind of aquifers can be considered particularly sensitive to the recharge variability both for the higher productivity and for their specific hydrogeological characteristics that favour the infiltration and the groundwater flow rather than the runoff. In fact, the feeding of the principal aqueduct systems in Southern Italy mainly depends on these aquifers owing to their high annual groundwater yield, which can be related to very high values of the potential infiltration coefficient values close to 100%, as well as to the concentration of the outflow in huge basal springs.

The test carbonate aquifer has been identified in the Monte Cervialto hydrogeological unit (Fig. 1). The basal groundwater flow in this hydrogeological unit, very well isolated from the other adjoining less-permeable hydrogeological units (CELICO, 1978; 1983) has a unique outflow represented by the Sanità basal spring in Caposele (AV) (420 m a.s.l.) with a mean discharge of about 4.0 m<sup>3</sup>/s. This basal spring notoriously represents the main feeding source of the Pugliese Aqueduct, so its discharges have been measured with a biweekly frequency since 1920 and with a continuous monitoring since 1964.

The discharge time series (1920-2005) has been elaborated analogously to those of the precipitation and thermometric data, up to the estimation of a normalised index of the mean annual discharge ( $Q_m$ ). The analysis shows clearly a complex decadal periodicity that well matches with the precipitation fluctuations and therefore with the NAO index itself. The cross-correlation analysis shows the highest value of the correlation coefficient ( $r = -0.530$ ) for a zero lag and a greater value ( $r = -0.710$ ) for the same time series, filtered with the 11-years moving average. In both cases the tests of statistic significance of the correlation coefficient are broadly passed (Fig. 9). The good correlation between the two time series can be simply shown by the graphical comparison between the 11-years moving averages that points out a phase correspondence, as well as a coincidence of the main peaks (Fig. 10). The clear discordance between the 11-years moving averages, observed between 1980 and 1996, could be related to the anomalous increase of the spring discharges which occurred after the great earthquake of 23<sup>rd</sup> November 1980 (CELICO, 1981; CELICO & MATTIA, 2002).

Moreover, we consider useful to demonstrate the correlation of NAO index and the maximum, mean and minimum annual values of the spring discharges (Fig. 11). In particular, minimum annual discharges are the more relevant for the management of the aqueduct system because they clearly represent the variation of groundwater reserves and therefore the aquifer recharge conditions.

With reference to the measurement period (1920-2005) a non-linear correlation can be recognised between the 11-years moving averages of the maximum, mean and minimum annual discharge and the 11-years moving average of the NAO index (Fig. 11). Also in this case, the value of the correlation coefficient confirms the statistical significance of the empirical relationships. The non-linear cor-

INFLUENCE OF THE NORTH ATLANTIC OSCILLATION (NAO) ON THE CLIMATIC VARIABILITY AND GROUNDWATER RESOURCES IN CARBONATE AQUIFERS OF SOUTHERN ITALY

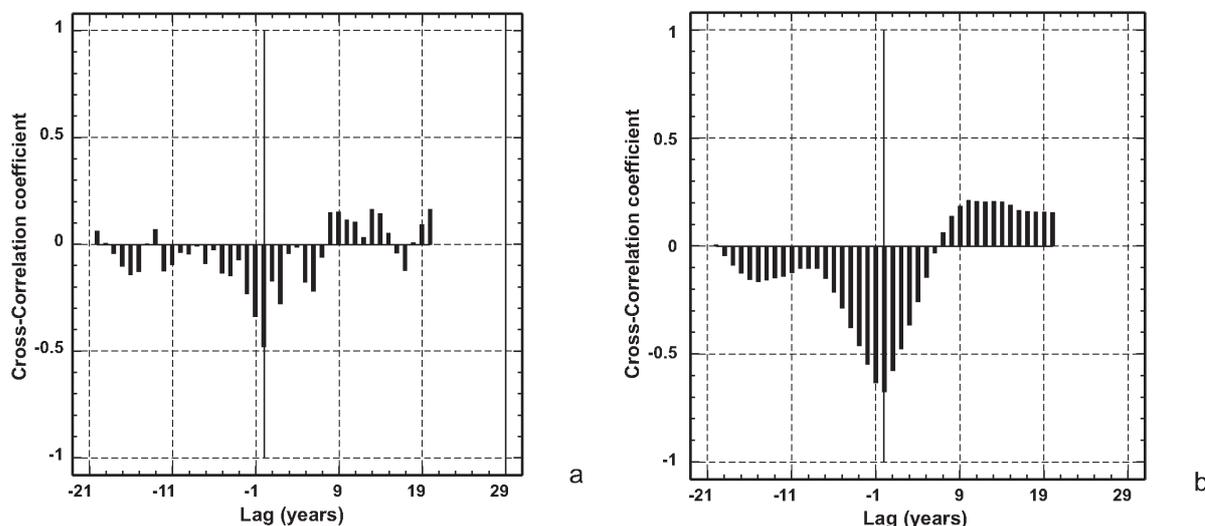


Fig. 9 - Analisi di cross-correlazione tra l'indice NAO e l'indice di portata media ( $Q_m$ ) effettuata su: a) serie storiche naturali ( $r = -0.530$ ; Prob. t-Student < 0.0001%; Prob. F-Fisher < 0.0001%); b) medie mobili a 11 anni ( $r = -0.710$ ; Prob. t-Student < 0.0001%; Prob. F-Fisher < 0.0001%). In quest'ultimo caso la correlazione aumenta grazie al filtraggio della tendenza di lungo periodo  
 - Cross-correlation analysis between the NAO index and the mean annual discharge index ( $Q_m$ ), carried out on: a) the original time series ( $r = -0.530$ ; Prob. t-Student < 0.0001%; Prob. F-Fisher < 0.0001%); b) the respective 11-years moving averages ( $r = -0.710$ ; Prob. t-Student < 0.0001%; Prob. F-Fisher < 0.0001%). In the latter case the correlation is higher because of the filtering out of the long-period trend

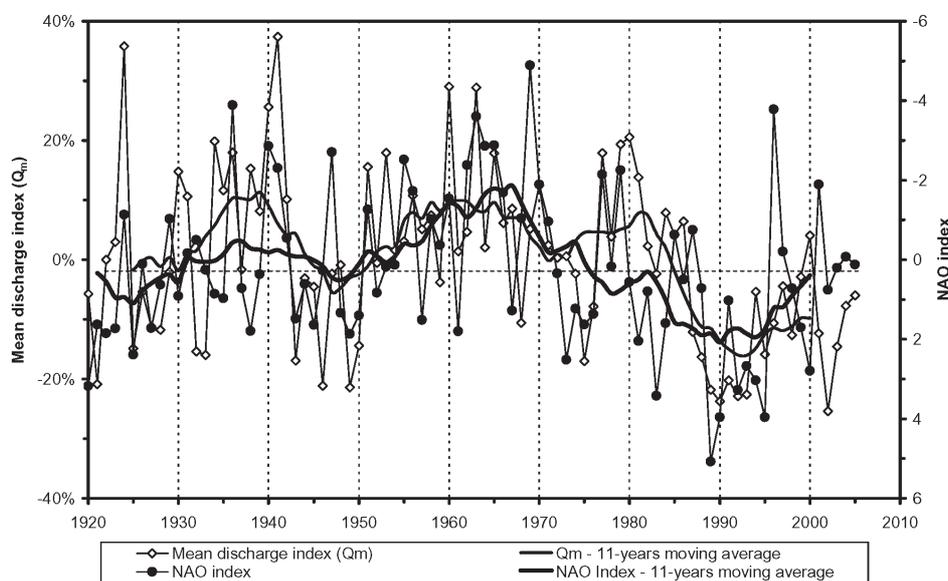


Fig. 10 - Confronto tra l'indice NAO e la portata media annua normalizzata ( $Q_m$ ) della sorgente Sanità di Caposele (1920-2005)  
 - Comparison between the NAO index and the mean annual discharge index ( $Q_m$ ) of the spring Sanità in Caposele (AV) (1920-2005)

dente valore della media mobile su undici anni dell'indice NAO (Fig. 11). Anche in questo caso il valore del coefficiente di correlazione conferma la significatività statistica della relazione empirica. L'andamento non lineare delle correlazioni evidenzia, su base empirica, il comportamento non lineare dell'evapotraspirazione che è percentualmente più rilevante durante i periodi di minore precipitazione.

relations reflect the behaviour of the evapotranspiration that is relatively more relevant during periods with lesser precipitations.

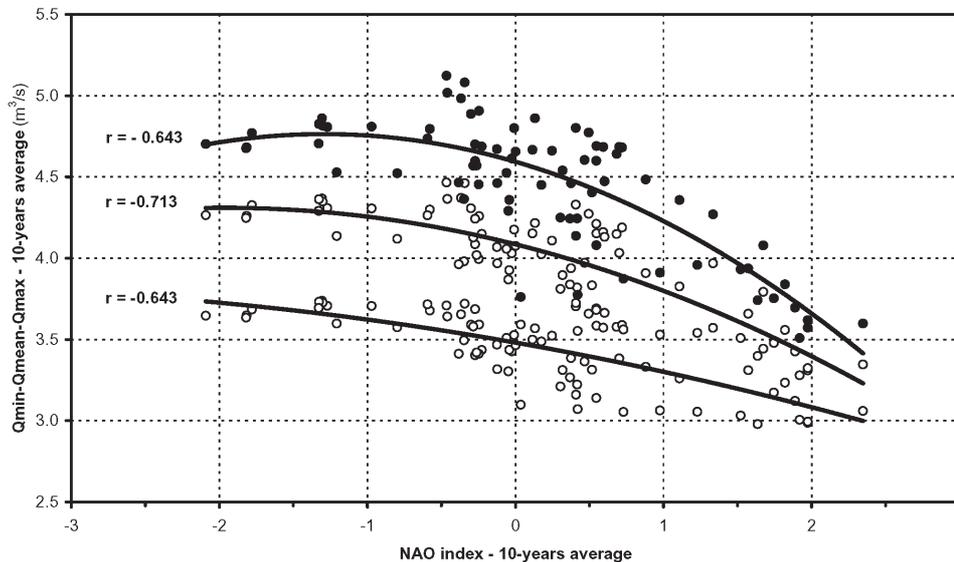


Fig. 11 - Correlazione tra i valori mediati su undici anni della portata massima (cerchio nero), media (cerchio grigio) e minima (cerchio bianco) e l'indice NAO. È possibile evidenziare il valore significativo del coefficiente di correlazione, calcolato su un modello interpolante di tipo quadratico  
 - Correlation between 11-years moving averages of maximum (black circle), mean (grey circle) and minimum (white circle) discharges values for the spring Sanità in Caposele (AV) and the corresponding NAO index values. The correlation coefficients are referred to the quadratic trend models

## CONCLUSIONI

L'analisi delle serie storiche (1921-1999) dei dati pluviometrici e termometrici delle stazioni gestite dall'ex Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (Compartimento di Napoli) ha consentito di rilevare l'evoluzione temporale delle caratteristiche climatiche dell'Italia meridionale. Tale analisi, basata sull'elaborazione di indici normalizzati, ha posto in risalto una variabilità climatica caratterizzata da una articolata e complessa ciclicità pluriennale, correlabile a fenomeni atmosferici agenti su scala continentale che condizionano la circolazione delle masse di aria umida provenienti nell'area mediterranea dall'Oceano Atlantico. In particolare, le fluttuazioni naturali delle precipitazioni e delle temperature dell'aria in Italia meridionale sono risultate essere influenzate dall'Oscillazione del Nord Atlantico (NAO), ovvero dalle variazioni del gradiente barometrico esistente tra l'anticiclone delle Azzorre e la depressione dell'Islanda, essendo ben correlate all'indice NAO.

Le variazioni climatiche connesse con tale fenomeno atmosferico si ripercuotono sulla ricarica degli acquiferi, comportando nel tempo analoghe fluttuazioni naturali cicliche dei volumi di risorse idriche sotterranee immagazzinate. Ciò è scaturito chiaramente dall'analisi comparata dell'indice NAO con i dati di portata (1920-2005) della sorgente Sanità di Caposele (AV), afferente all'unità idrogeologica del Monte Cervialto.

Sulla base dei dati analizzati, l'indice NAO ha mostrato un cambiamento di fase (positiva o negativa) con periodicità variabile tra 30 e 40 anni. Ciò consentirebbe di ipotizzare, nell'ambito di un'ottimale gestione a medio-lungo termine delle risorse idriche sotterranee, scenari per la mitigazione dei fenomeni siccitosi, basati sulla model-

## CONCLUSIONS

The analysis of the time series (1921-1999) of precipitations and air temperature data recorded by the ex-Hydrographic and Tidal National Service (Department of Naples) monitoring stations points out the temporal evolution of the climatic characteristics of the Southern Italy. The analyses based on the elaboration of normalised indexes, show a climatic variability which is characterised by a complex decadal periodicity. The latter can be related to a large scale atmospheric phenomena that influence the circulation of humid air-masses coming into the Mediterranean area from the Atlantic Ocean. In particular, natural fluctuations of precipitations and of air temperatures in Southern Italy are clearly correlated to the North Atlantic Oscillation (NAO), namely to the variation of the barometric gradient between the Azores's anticyclone and Iceland's barometric low, being well correlated with the NAO index.

Climatic variations induced by the NAO influence the aquifer recharge involving the annual variation of the groundwater yield. Analysis of the discharge data (1920-2005) of the Sanità spring in Caposele (AV), belonging to the Mount Cervialto hydrogeological carbonate unit, confirms the existence of a decadal variations that match with the NAO index.

On the basis of the analysed time series, the NAO index has shown a phase change, from positive to negative, with a periodicity variable in the range 30÷40 years. This evidence allows the hypothesis, within the framework of an optimal medium to long term groundwater resources management, of drought scenarios based on the modelling of the recharge decrease in great aquifers. The long term modelling of the recharge variability of the huge

lazione del comportamento dei grandi acquiferi in relazione al decremento della ricarica. La modellazione nel lungo periodo dei grandi acquiferi carbonatici in Italia meridionale potrebbe essere basata sull'uso integrato di modelli di circolazione globale (GCMs) che considerano il fenomeno dell'Oscillazione del Nord Atlantico, anche in relazione a differenti scenari di immissione di gas-serra (COHEN *et alii*, 2005). Infatti, la correlazione tra la variabilità pluriennale dei dati meteo-climatici della Campania e quella dell'indice NAO non esclude la possibilità che le recenti fluttuazioni climatiche possano essere in qualche modo influenzate anche da cause antropiche, essendo state formulate varie ipotesi circa gli effetti sulla NAO sia dell'attività solare che dei gas-serra emessi dall'uomo (HURRELL, 2003; COHEN & BARLOW, 2005).

In definitiva, da tutto quanto fin qui esposto, e prescindendo dalla necessità di ampliare ulteriormente l'ambito territoriale e di differenziare gli acquiferi esaminati, i risultati raggiunti consentono di ampliare la conoscenza dei meccanismi che regolano la variabilità climatica permettendo di completare la comprensione delle relazioni esistenti tra la componente atmosferica e quella sotterranea del ciclo idrologico. Tale relazione, sulla base di analisi predittive della NAO, consentirebbe di formulare appropriate strategie di gestione e di salvaguardia delle risorse idriche sotterranee e di prospettare le più adeguate soluzioni progettuali per mitigare gli effetti dei fenomeni di siccità.

## OPERE CITATE / REFERENCES

- BARNSTON A.G. & LIVEZEY R.E. (1987) - *Classification, Seasonality, and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns*. Monthly Weather Review, **115**: 1083-1126.
- BJERKNES J. (1969) - *Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific*. Monthly Weather Review, **97** (January): 163-172.
- CELICO F. & MATTIA C. (2002) - *Analisi degli effetti indotti dal sisma del 23/11/1980 sugli equilibri idrogeologici della sorgente Sanità (Campania), mediante simulazione ragionata delle dinamiche di ricarica e esaurimento*. Quaderni di Geologia Applicata, **1**: 5-18.
- CELICO P. (1978) - *Schema idrogeologico dell'Appennino carbonatico centro-meridionale*. Memorie e Note Istituto di Geologia Applicata, **14**, Napoli: 1-97.
- CELICO P. (1981) - *Relazioni tra idrodinamica sotterranea e terremoti in Irpinia (Campania)*. Rendiconti Società Geologica Italiana, **4**: 103-108.
- CELICO P. (1983) - *Idrogeologia dei massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale (Marche e Lazio meridionale, Abruzzo, Molise e Campania)*. Quaderni della Cassa per il Mezzogiorno, **4/2**, Roma.
- CELICO F., CELICO P., DE VITA P. & PISCOPO V. (2000) - *Groundwater flow and protection in the Southern Apennines (Italy)*. Hydrogeology, **4**: 39-47.
- COHEN J., FREI A. & ROSEN R.D. (2005) - *The Role of Boundary Conditions in AMIP-2 Simulations of the NAO*. Journal of Climate, **18**: 973-981.
- COHEN J. & BARLOW M. (2005) - *The NAO, the AO, and Global Warming: How Closely Related?* Journal of Climate, **18**: 4498-4513.
- COTECCHIA V., CASARANO D. & POLEMIO M. (2003) - *Piuvosità e siccità in Italia meridionale tra il 1821 ed il 2001*. L'Acqua, Associazione Idrotecnica Italiana, **2**: 99-106.
- CULLEN H. & DEMENOCAL P.B. (1997) - *North Atlantic Influence on Middle Eastern Climate and Water Supply*. Proceedings from a Meeting on Atlantic Climate Variability Lamont-Doherty Earth Observatory.
- DE VITA P. (2001) - *Lineamenti climatici e "rischio idrogeologico*. In: "Il dissesto idrogeologico in Campania" di A. Vallario - Editore CUEN, Napoli: 117-126.
- HURRELL J.W. (1995) - *Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation*. Science, **269**: 676-679.
- HURRELL J. W. & VAN LOON H. (1997) - *Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation*. Climatic Change, **36**: 301-326.
- HURRELL, J. W. (2003) - *EOS Bookshelf: The North Atlantic Oscillation*. EOS, **84**: 73.
- IPCC Climate Change (2001) - *The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, Van der Linden PJ, Xiaosu D (eds) Cambridge University Press, UK.
- MAZZARELLA A. (1999) - *Rainfall multifractal dynamic processes in Italy*. Theor. Appl. Climatol., **63**: 73-78.
- RÄISÄNEN J., HANSSON U., ULLERSTIG A., DÖSCHER R., GRAHAM L.P., JONES C., MEIER HEM, SAMUELSSON P. & WILLÉN U. (2004) - *European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios*. Clim, Dynam **22**: 13-31.

INFLUENZA DELL'OSCILLAZIONE DEL NORD ATLANTICO (NAO) SULLA VARIABILITÀ CLIMATICA E SULLE RISORSE IDRICHE SOTTERRANEE DEGLI  
ACQUIFERI CARBONATICI DELL'ITALIA MERIDIONALE

TOOTLE G., PIECHOTA T. & SINGH A. (2005) – *Coupled oceanic-atmospheric variability and U.S. streamflow*. Water Resources Research, **41**(12), doi: 10.1029/2005WR004381.

TURC L. (1954) – *Le bilan d'eau des sols: relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement*. Annales agronomiques, Paris: 491-595 et (1955): 5-131.

TÜRKEŞ M. & ERLAT E. (2005) – *Climatological responses of winter precipitation in Turkey to variability of the North Atlantic Oscillation during the period 1930-2001*. Theoretical and Applied Climatology, **81**: 45-69.

WALKER G.T. (1924) - *Correlations in seasonal variations of weather*. IX Mem. Ind. Meteor. Dept.

*Received March 2006 - Accepted June 2006*