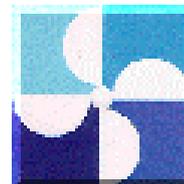
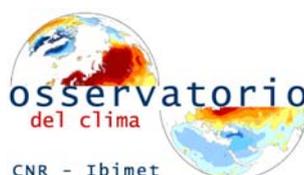




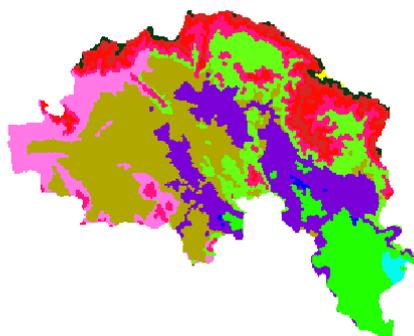
Consiglio Nazionale delle Ricerche



FMA



ASPETTI CLIMATICI E IDROLOGICI NEL BACINO DEL FIUME ARNO AI FINI DELLA REDAZIONE DEL BILANCIO IDRICO



AUTORITA' DI BACINO DEL FIUME ARNO



Autorità di bacino del Fiume Arno

(Legge 18 maggio 1989, n. 183 - Legge 4 dicembre 1993, n. 493)

Esecutori :

Francesco Meneguzzo (resp.), Giampiero Maracchi, Francesco Piani, Giacomo Barcaioli



PREMESSA

Il presente Capitolo traccia un quadro generale e specifico del contesto climatico, storico ed evolutivo, caratterizzante il Bacino del Fiume Arno, nonché delle tendenze idrologiche correnti, in termini di portata lungo l'asta principale dell'Arno.

Il Capitolo si articola a sua volta in paragrafi, ciascuno dei quali dedicato a un tema di particolare rilevanza.

Il primo paragrafo illustra il quadro climatico generale, a scala molto più grande del Bacino del Fiume Arno, sia per quanto riguarda il clima alla superficie che rispetto alle strutture fondamentali della circolazione atmosferica.

Il secondo e terzo paragrafo trattano rispettivamente dei regimi termico e pluviometrico alla scala del Bacino dell'Arno, quindi dell'analisi dei dati rilevanti presso alcune stazioni rappresentative situate sul Bacino.

Il quarto paragrafo presenta una caratterizzazione sintetica del clima fisico sul Bacino, illustrata per mezzo della regionalizzazione del clima locale osservato presso una serie di stazioni, e l'individuazione ed estrazione di aree climaticamente omogenee, in base alla variabilità congiunta di vari tipi di dati.

Il quinto paragrafo illustra il tema della variabilità climatica, in termini delle grandezze atmosferiche fondamentali, che hanno interessato il Bacino del Fiume Arno, sia a grande scala che a livello regionale e locale.

Il sesto paragrafo espone lo stato corrente del rischio di siccità sul Bacino dell'Arno.

Il settimo e ultimo paragrafo illustra il regime idrologico delle portate fluviali, lungo l'asta principale dell'Arno, e in particolare la relativa evoluzione storica.



1. QUADRO CLIMATICO GENERALE

Il quadro climatico generale, afferente ai decenni più recenti e ad una vasta area di dimensioni continentali, in cui è inserito il Bacino dell'Arno, è illustrato attraverso il clima fisico presso la superficie e i regimi di circolazione atmosferica, a loro volta descritti a partire da grandi data base su griglia geografica regolare, mediati o cumulati, secondo la grandezza in considerazione, sulle quattro stagioni dell'anno.

1.1. Clima fisico presso la superficie

Il clima fisico presso la superficie è illustrato attraverso i campi della temperatura superficiale media stagionale, della precipitazione cumulata stagionale e del vento medio stagionale a circa 1500 m di quota.

Le Fig. 1(a)-(c) si riferiscono all'Inverno (Gennaio-Marzo).

Il Bacino dell'Arno si trova nella regione di transizione tra il mite clima Mediterraneo e i rigori continentali (Fig. 1a); è evidente la dominanza sul regime termico del grado di continentalità; la temperatura media è compresa tra 6°C e 8°C.

Per quanto riguarda la pluviometria (Fig. 1b), i valori sono tipici della sponda nord del Mediterraneo, intermedi tra quelli mediamente elevati dall'Europa centro-settentrionale e del versante Atlantico, e quelli più bassi dell'Europa orientale.

I venti, infine (Fig. 1c), sono mediamente molto deboli, sia rispetto all'Europa centrale, settentrionale e orientale, che rispetto alle aree marittime e costiere meridionali del Mediterraneo.

Le Fig. 2(a)-(c) si riferiscono alla Primavera (Aprile-Giugno).

Il grado di continentalità non appare ormai importante rispetto al regime termico primaverile, e il Bacino dell'Arno si trova a condividere valori di temperatura molto simili ad altre regioni poste alla stessa latitudine (Fig. 2a); la temperatura media è compresa tra 14°C e 16°C.

Per quanto riguarda la pluviometria (Fig. 2b), sul Bacino dell'Arno questa appare intermedia tra i valori già bassi delle zone più meridionali dell'Europa Mediterranea e i massimi dell'Europa Centrale e Balcanica.



I venti (Fig. 2c) sono mediamente piuttosto deboli, nel quadro di una circolazione di intensità intermedia tra quella che insiste sulle Regioni centro-meridionali italiane e quella, assai debole, che interessa la Pianura Padana. Mentre in Inverno la direzione prevalente era nord-occidentale, probabilmente in conseguenza della maggior insistenza, tipica dei decenni più recenti, del ramo orientale dell'Anticiclone delle Azzorre, in Primavera si affermano venti più occidentali, verosimilmente legati alla maggior frequenza delle perturbazioni in viaggio da ovest verso est.

Le Fig. 3(a)-(c) si riferiscono all'Estate (Luglio-Settembre).

I gradienti termici sono più contenuti rispetto alle precedenti due stagioni (Fig. 3a), mentre il Bacino dell'Arno si trova, in Estate, a condividere il regime termico dell'area Mediterranea, con valori decisamente alti; la temperatura media è compresa tra 20°C e 22°C.

Per quanto riguarda la pluviometria (Fig. 3b), mentre le aree più meridionali dell'Europa Mediterranea sono interessate da scarsissime precipitazioni, e l'Europa nord-occidentale, centrale e in buona misura anche orientale ricevono significative quantità di pioggia, il Bacino dell'Arno, almeno nel periodo di riferimento (1986-2002) gode di precipitazioni complessivamente intermedie, inferiori al periodo Primaverile, ma addirittura superiori al periodo Invernale!

I venti (Fig. 3c) sul Bacino dell'Arno si dispongono nuovamente in media da nord-ovest e sono molto deboli, derivando dalla lontananza dalle circolazioni più sostenute e persistenti, come quella del vicino Atlantico (*trade winds*), legata all'Anticiclone sub-tropicale, a quella del Mediterraneo orientale, legata alla confluenza tra il bordo orientale del promontorio anticiclonico atlantico e la depressione monsonica stazionante sul Golfo Persico, e infine il flusso occidentale di origine Atlantica, che scorre a latitudini più settentrionali.

Le Fig. 4(a)-(c) si riferiscono infine all'Autunno (Ottobre-Dicembre).

Il grado di continentalità assume nuovamente una notevole rilevanza ai fini della distribuzione delle temperature (Fig. 4a), e di nuovo il Bacino dell'Arno si trova nella zona di transizione tra il clima Mediterraneo, mite e localmente ancora caldo, e le fredde aree Europee centrali e orientali, con temperature medie dell'ordine di 12°C.

Le precipitazioni sono le più abbondanti dell'anno (Fig. 4c), prossime in quanto a valori complessivi a quelle osservate su molte aree prossime alle coste Mediterranee dell'Europa, e sull'Europa occidentale.



I venti (Fig. 4c) sul Bacino dell'Arno, in media assai deboli, assumono come in Primavera una prevalente componente occidentale, segno del passaggio frequente delle perturbazioni.

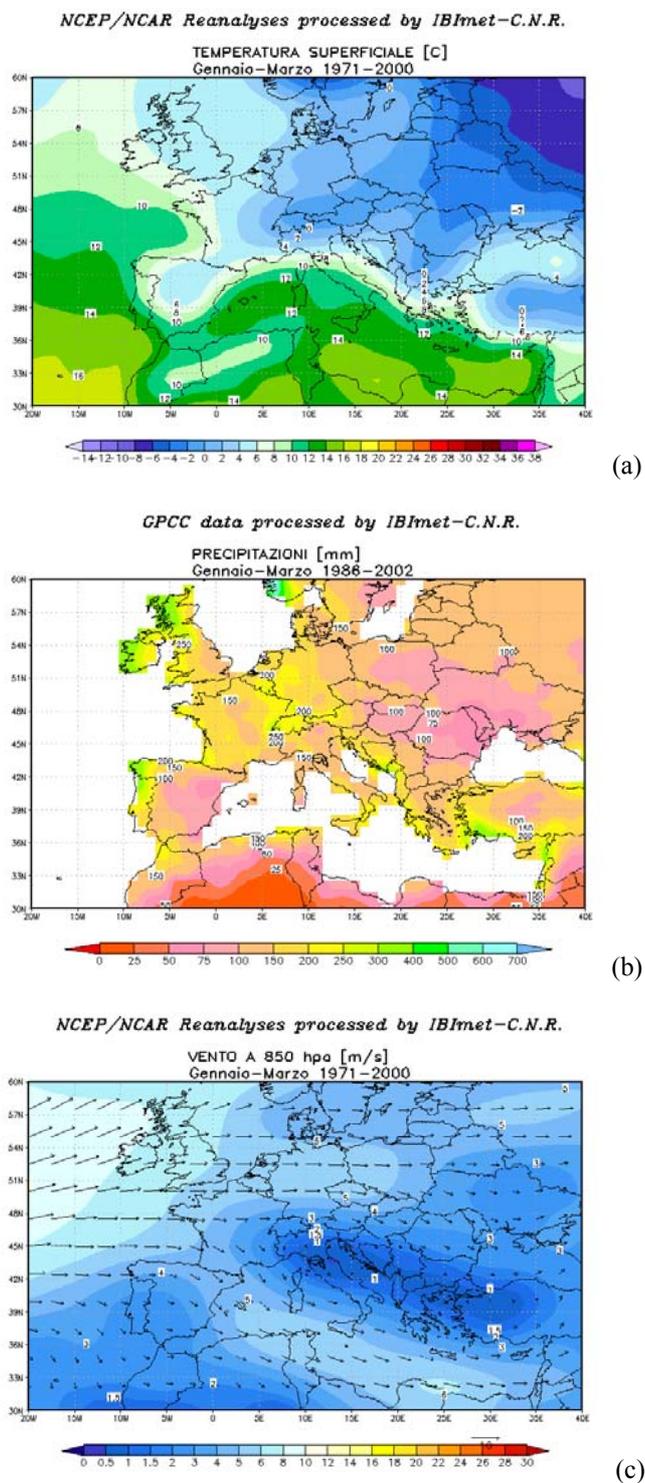
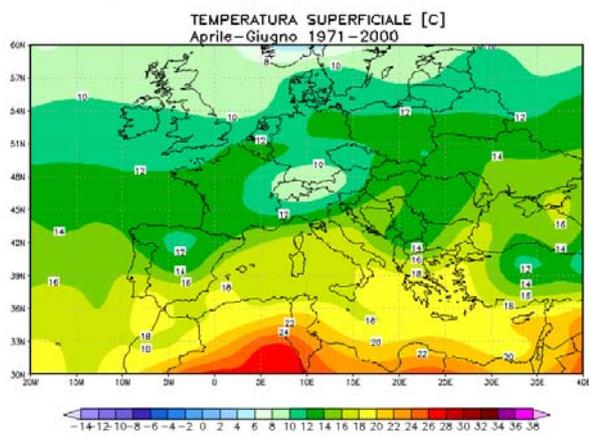


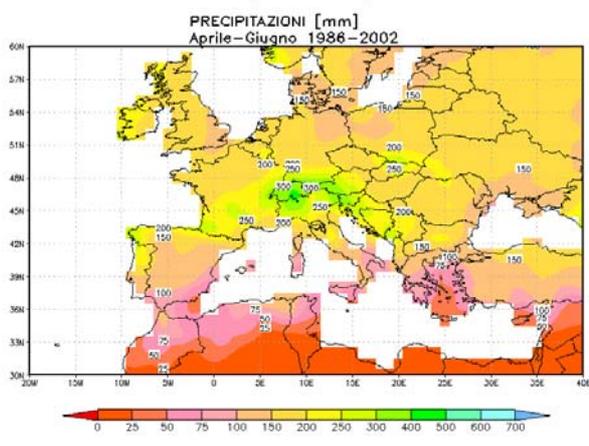
Fig. 1 – Campi di temperatura superficiale media (a), precipitazione cumulata (b) e vento medio a circa 1500 m di quota (c), nel periodo invernale (Gennaio-Marzo)



NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBImet-C.N.R.



GPCC data processed by IBImet-C.N.R.



NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBImet-C.N.R.

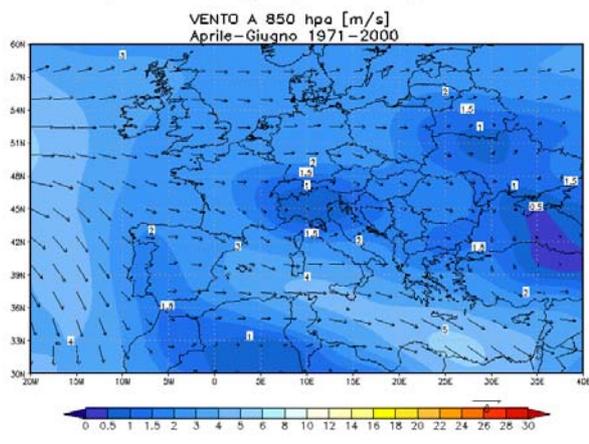
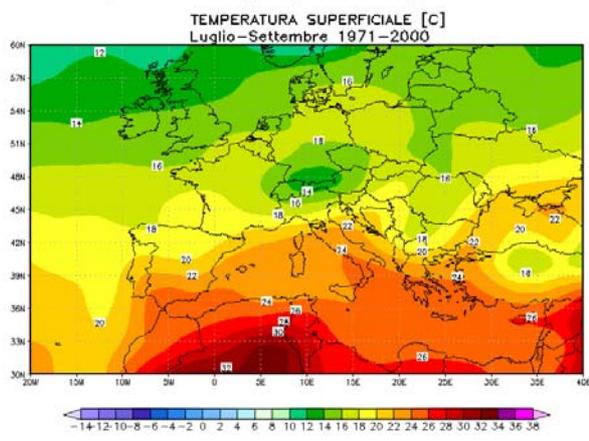


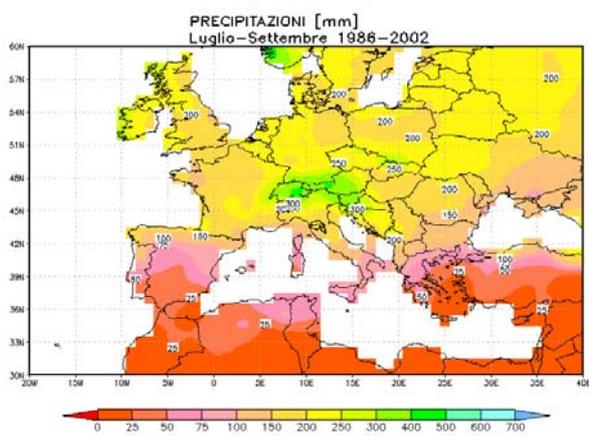
Fig. 2 – Campi di temperatura superficiale media (a), precipitazione cumulata (b) e vento medio a circa 1500 m di quota (c), nel periodo primaverile (Aprile-Giugno)



NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBimet-C.N.R.



GPCC data processed by IBimet-C.N.R.



NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBimet-C.N.R.

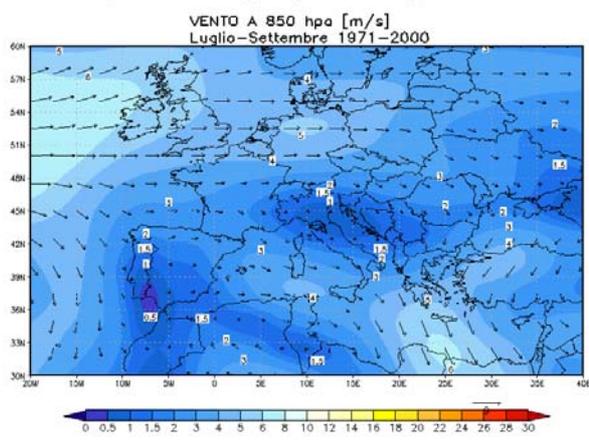
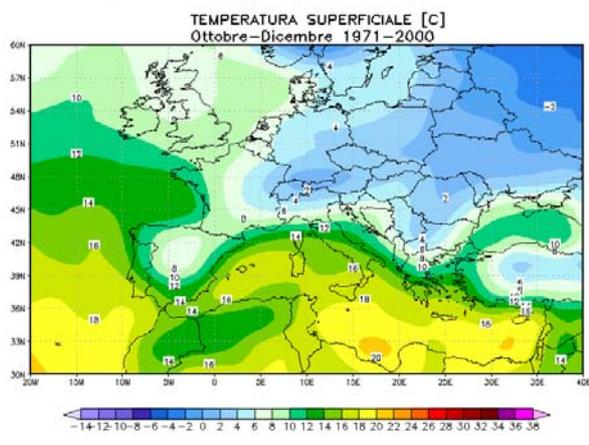


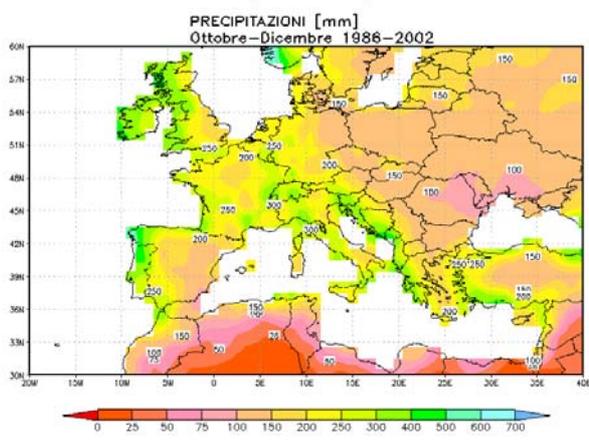
Fig. 3 – Campi di temperatura superficiale media (a), precipitazione cumulata (b) e vento medio a circa 1500 m di quota (c), nel periodo estivo (Luglio-Settembre)



NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBImet-C.N.R.



GPCC data processed by IBImet-C.N.R.



NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBImet-C.N.R.

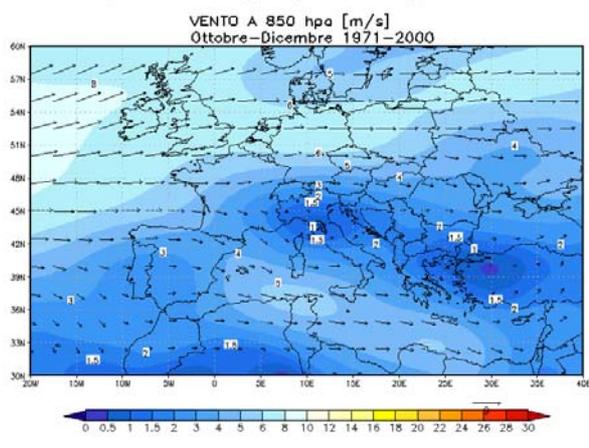


Fig. 4 – Campi di temperatura superficiale media (a), precipitazione cumulata (b) e vento medio a circa 1500 m di quota (c), nel periodo autunnale (Ottobre-Dicembre)



1.2. Strutture della circolazione atmosferica

Le strutture della circolazione atmosferica sono illustrate attraverso i campi dell'altezza geopotenziale a 500 hPa (mediamente 5500 metri di quota), della pressione al livello del mare, e della intensità delle perturbazioni, quest'ultima definita in base alla varianza del vento meridionale osservato nell'alta troposfera, usando un filtro a 24 ore che tiene conto della velocità tipica di spostamento delle perturbazioni stesse e della loro vita media.

Le Fig. 5(a)-(c) si riferiscono all'Inverno (Gennaio-Marzo).

Il Bacino dell'Arno si trova prevalentemente dominato, nella media troposfera (Fig. 5a) dal bordo orientale di un vastissimo promontorio anticiclonico che ha il proprio centro d'azione sul medio Atlantico, responsabile delle condizioni di stabilità e quindi delle scarse precipitazioni; per questa ragione, l'Italia e i mari circostanti sono interessati da valori di pressione anche presso la superficie piuttosto elevati (Fig. 5b), e tuttavia da un minimo barico relativo, di limitata estensione, situato sottovento all'arco Alpino rispetto al flusso nord-occidentale. Da notare la vasta area anticiclonica, per lo più limitata agli strati più bassi di atmosfera, a est-nord-est della Penisola Italiana, e il flusso, sostenuto e umido, sud-occidentale parecchi gradi di latitudine a nord dell'Italia.

A quest'ultima caratteristica è legato il percorso principale delle perturbazioni (Fig. 5c), che da latitudini anche relativamente basse (40°N) presso le coste orientali del Nord America si dirige verso nord-est, approdando all'Europa a latitudini almeno 10° maggiori, e investendo solo marginalmente e occasionalmente l'Italia e il Bacino dell'Arno.

Scarsità di precipitazioni invernali e debolezza della circolazione nei bassi strati sono ampiamente spiegati dalle menzionate caratteristiche della circolazione atmosferica.

Le Fig. 6(a)-(c) si riferiscono alla Primavera (Aprile-Giugno).

La configurazione del campo di altezze geopotenziale a 500 hPa (Fig. 6a) suggerisce una neutralità rispetto a promontori e saccature, con valori comunque più alti rispetto all'inverno, com'è ovvio considerando il riscaldamento della bassa e media troposfera.

Il campo dell'intensità delle perturbazioni (Fig. 6c) non è dissimile, nonostante i valori inferiori, rispetto a quello invernale, tuttavia sistemi perturbati più frequenti e intensi devono interessare il bacino occidentale del Mediterraneo e quindi il Bacino dell'Arno, se la pressione al livello del mare



(Fig. 6b) è più bassa rispetto a quella invernale; un minimo barico isolato è localizzato in Primavera sul Golfo Ligure.

Le Fig. 7(a)-(c) si riferiscono all'Estate (Luglio-Settembre).

In Estate, il campo di geopotenziale nella media troposfera (Fig. 7a) mostra nuovamente un promontorio anticiclonico, che dal Nord Africa si estende fino al Baltico; al livello del mare (Fig. 7b), invece, una configurazione di alta pressione deriva dall'anticiclone detto "delle Azzorre", che estende la sua influenza fino all'Europa centro-orientale, con cui coesistono sistemi stazionari di bassa pressione di origine termica (entroterra africano) e monsonica (Medio Oriente), oltre che il consueto flusso sud-occidentale, sovente ciclonico, che insiste a latitudini molto settentrionali. Il suddetto promontorio anticiclonico in quota appare quindi di origine mista dinamica e termica, quest'ultima legata al sensibile riscaldamento della bassa e media troposfera.

Le perturbazioni (Fig. 7c) assumono complessivamente un percorso più zonale (da ovest a est), ed è comunque interessante notare che, sull'Italia settentrionale e sul Bacino dell'Arno, in Estate non diminuiscono d'intensità/frequenza rispetto alla Primavera, contrariamente a quanto accade sulle Regioni meridionali italiane.

Le Fig. 8(a)-(c) si riferiscono all'Autunno (Ottobre-Dicembre).

Il campo di geopotenziale a 500 hP (Fig. 8a), assume sull'Italia e parte del Mediterraneo centro-orientale una debole curvatura ciclonica, effetto dei vari sistemi ciclonici che in questa stagione si formano anche direttamente sottovento a Pirenei, Alpi e Atlante, circostanza confermata anche dal campo della pressione al livello del mare (Fig. 8b), che evidenzia un minimo barico relativo, ben strutturato, esteso dal Mediterraneo sottovento ai Pirenei, fino al Mediterraneo orientale. L'anticiclone del medio Atlantico è invece ai suoi minimi, così da favorire l'ingresso più frequente delle perturbazioni, per altro ostacolate e rallentate nel loro progresso verso est dal blocco di alta pressione che si va formando sui Balcani e l'Europa orientale.

Per queste ragioni, e per l'ancora elevata temperatura del Mar Mediterraneo, le precipitazioni, più frequenti e intense, raggiungono il loro picco sul Bacino dell'Arno in Autunno.

Il campo delle perturbazioni (Fig. 8c), infine, somiglia molto a quello invernale, con valori appena inferiori, riflettendo probabilmente la difficoltà di questa analisi, eseguita a risoluzioni spaziali



orizzontali dell'ordine di $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ in Latitudine e Longitudine, di cogliere l'evoluzione di perturbazioni alla più limitata scala Mediterranea.

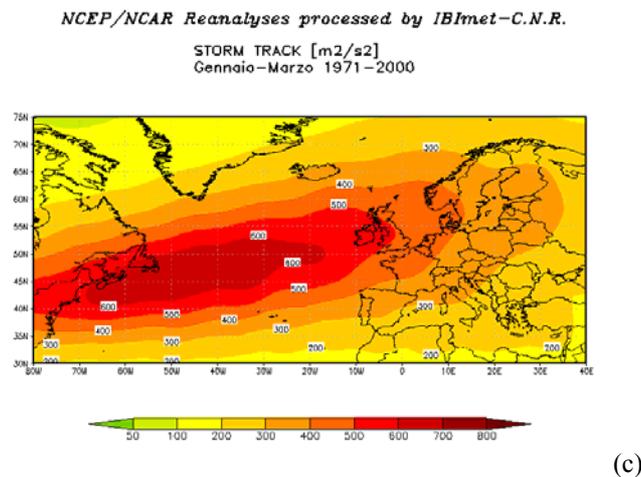
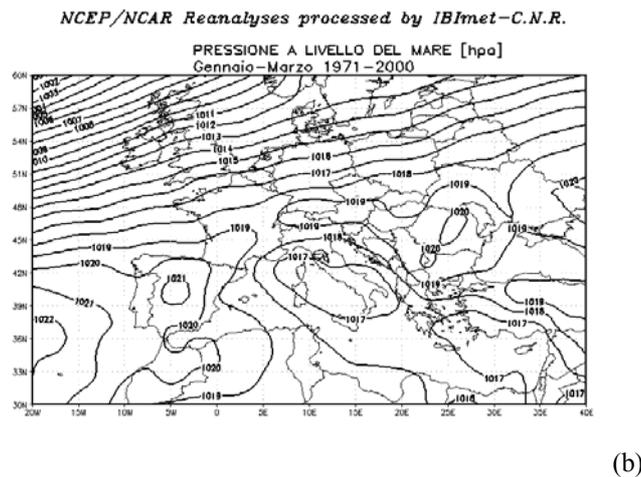
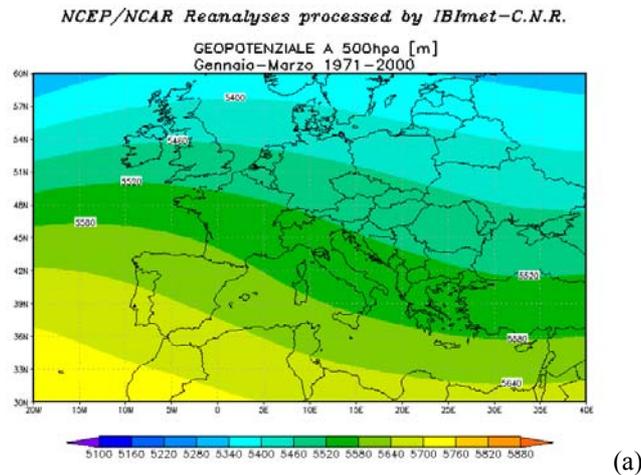
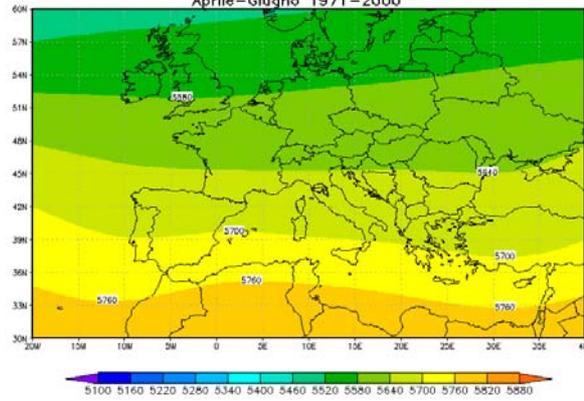


Fig. 5 – Campi medi di altezza geopotenziale medio a 500 hPa (a), pressione al livello del mare (b) e intensità delle perturbazioni (c), nel periodo invernale (Gennaio-Marzo)



NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBImet-C.N.R.

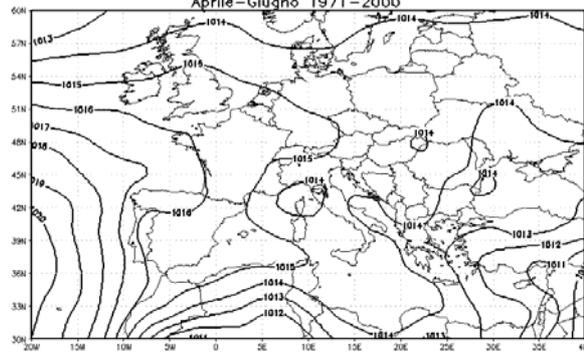
GEOPOTENZIALE A 500hpa [m]
Aprile-Giugno 1971-2000



(a)

NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBImet-C.N.R.

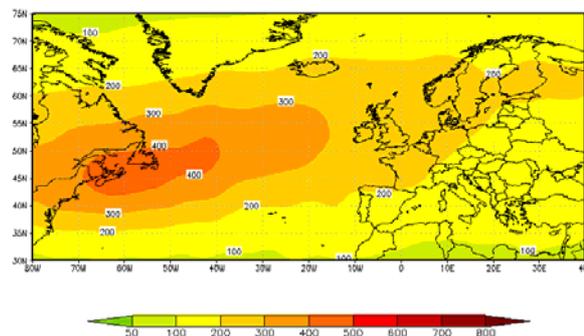
PRESSIONE A LIVELLO DEL MARE [hpa]
Aprile-Giugno 1971-2000



(b)

NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBImet-C.N.R.

STORM TRACK [m2/s2]
Aprile-Giugno 1971-2000

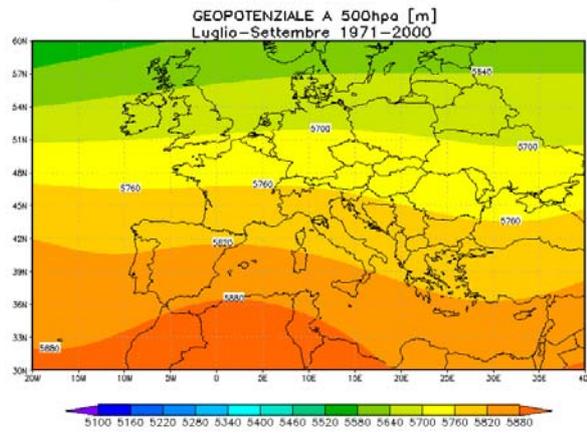


(c)

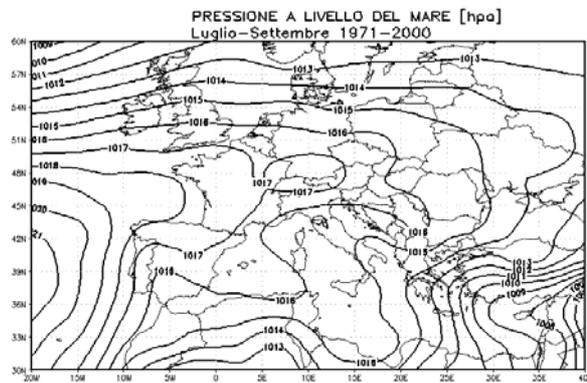
Fig. 6 – Campi medi di altezza geopotenziale a 500 hPa (a), pressione al livello del mare (b) e intensità delle perturbazioni (c), nel periodo primaverile (Aprile-Giugno)



NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBimet-C.N.R.



NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBimet-C.N.R.



NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBimet-C.N.R.

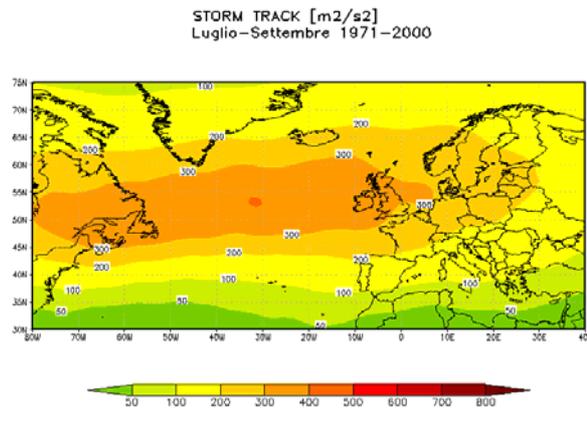
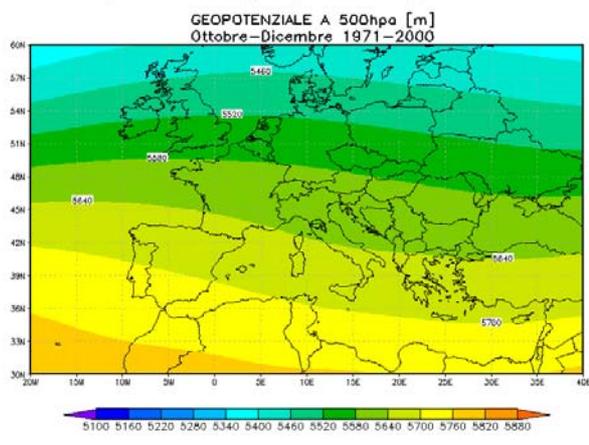


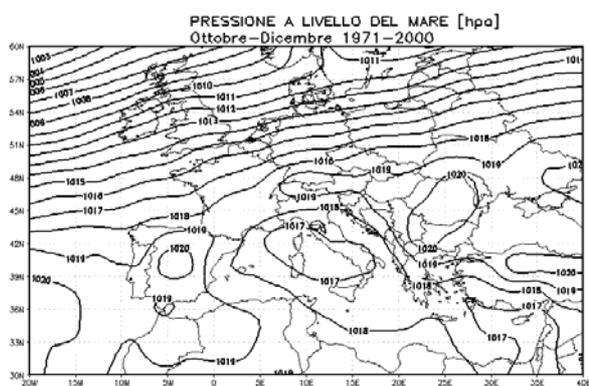
Fig. 7 – Campi medi di altezza geopotenziale a 500 hPa (a), pressione al livello del mare (b) e intensità delle perturbazioni (c), nel periodo estivo (Luglio-Settembre)



NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBImet-C.N.R.



NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBImet-C.N.R.



(b)

NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBImet-C.N.R.

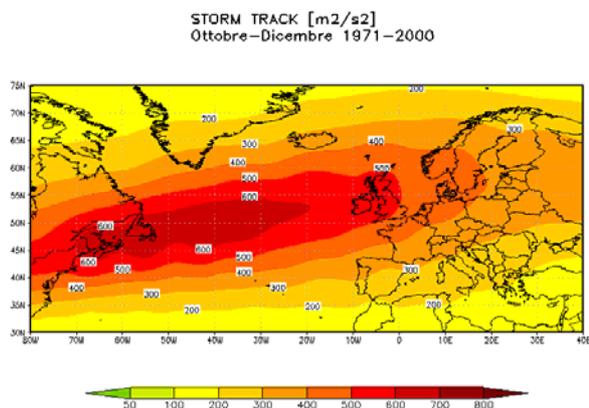


Fig. 8 – Campi medi di altezza geopotenziale a 500 hPa (a), pressione al livello del mare (b) e intensità delle perturbazioni (c), nel periodo autunnale (Ottobre-Dicembre)



2. REGIME TERMICO

Il regime termico alla scala del Bacino del Fiume Arno è illustrato per mezzo della evoluzione delle medie mensili delle temperature massime e minime, nell'arco dell'anno, presso alcune stazioni appartenenti a diversi sottobacini, afferenti al periodo storico 1961-1990. I criteri di selezione delle stazioni sono stati quello della rappresentatività e della disponibilità, qualità e omogeneità nel tempo dei dati. Sono indicate anche, laddove la continuità e l'omogeneità delle serie lo consente, le deviazioni standard delle serie storiche stesse, da cui sono stati derivati i valori medi.

Nelle figure da Fig. 9 a Fig. 20 emerge il marcato ciclo termico annuale, caratterizzato da escursioni medie comprese tra i 15°C delle minime e i 20°C delle massime; laddove, come nel caso del Casentino, sono state considerate una stazione di montagna e una di fondovalle, è interessante notare come l'ampiezza del ciclo termico sia molto simile, mentre le differenze riguardano soprattutto le temperature massime, essendo le differenze delle temperature minime molto limitate, in ragione dei frequenti e intensi fenomeni di inversione termica, caratteristici in primo luogo del periodo invernale, ma comuni anche nelle altre stagioni.

E' interessante anche notare come la variabilità, rappresentata per mezzo delle deviazione standard, sia decisamente più elevata nei periodi tardo-invernale e primaverile, certamente in ragione della notevolissima variabilità dei regimi climatici a scala più grande in questo periodo dell'anno.

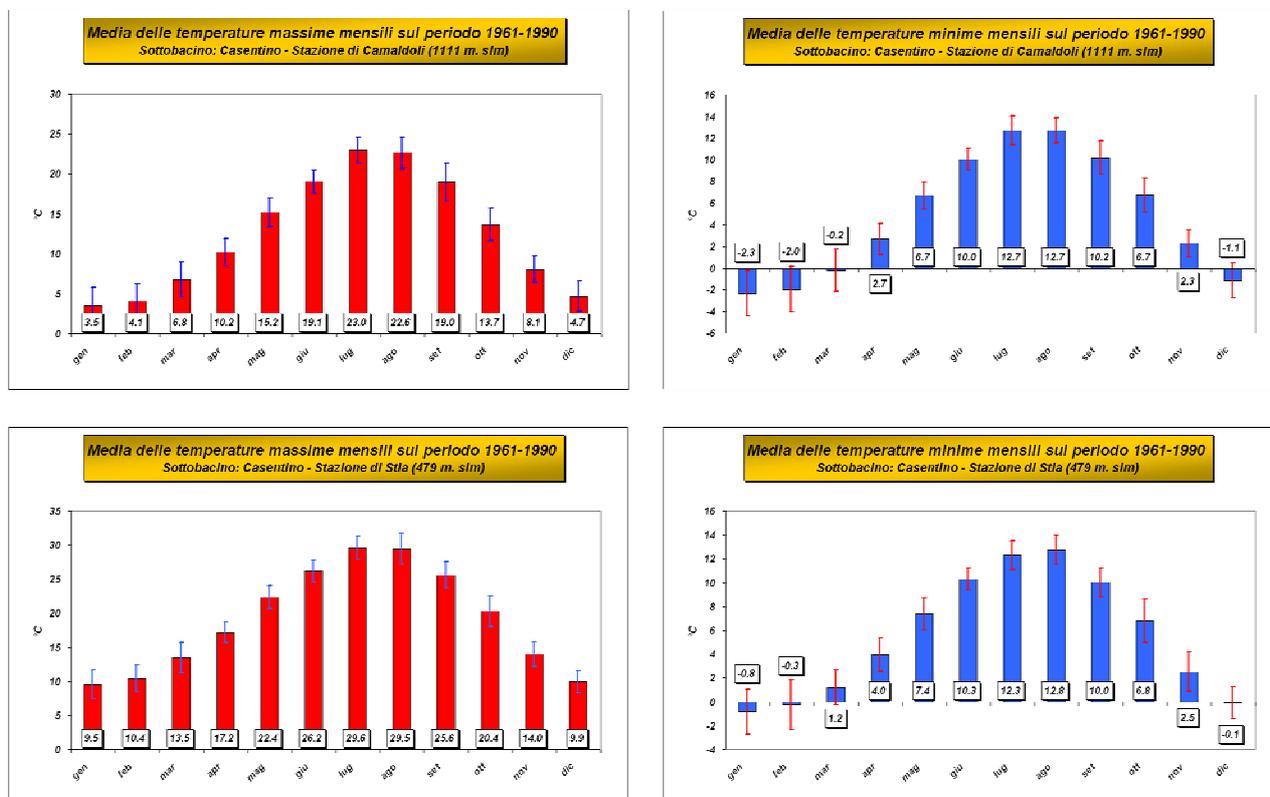


Fig. 9 – Sottobacino del Casentino: media mensile delle temperature massime e minime, nel periodo 1961-1990

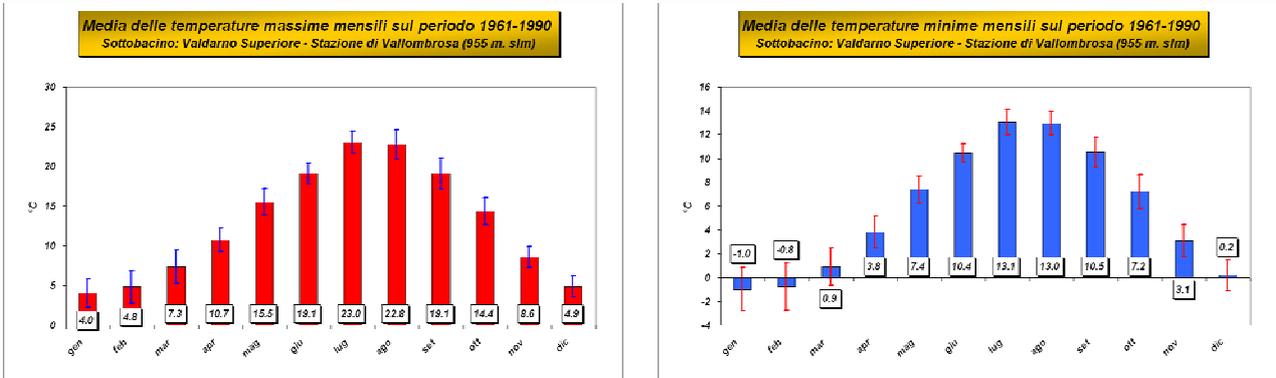


Fig. 10 – Sottobacino del Valdarno Superiore: media mensile delle temperature massime e minime, nel periodo 1961-1990

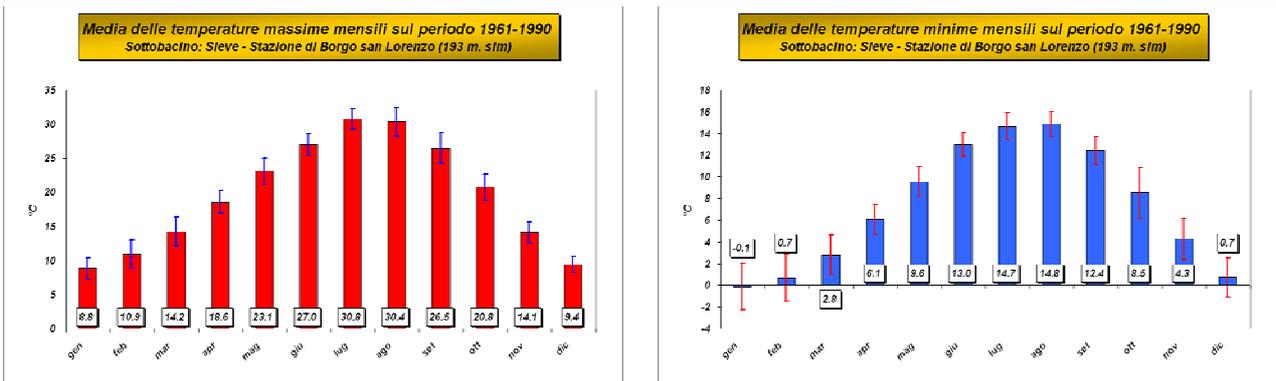


Fig. 11 – Sottobacino della Sieve: media mensile delle temperature massime e minime, nel periodo 1961-1990

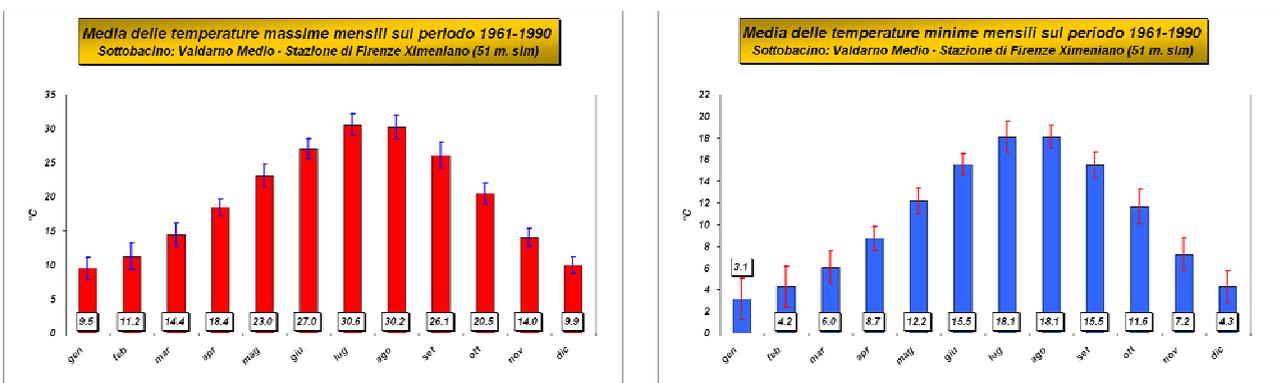


Fig. 12 – Sottobacino del Valdarno Medio: media mensile delle temperature massime e minime, nel periodo 1961-1990

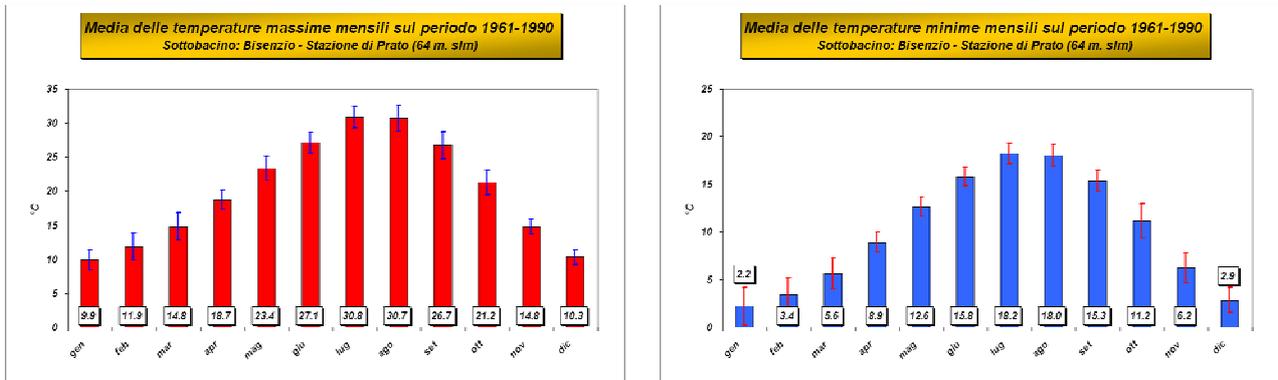


Fig. 13 – Sottobacino del Bisenzio: media mensile delle temperature massime e minime, nel periodo 1961-1990

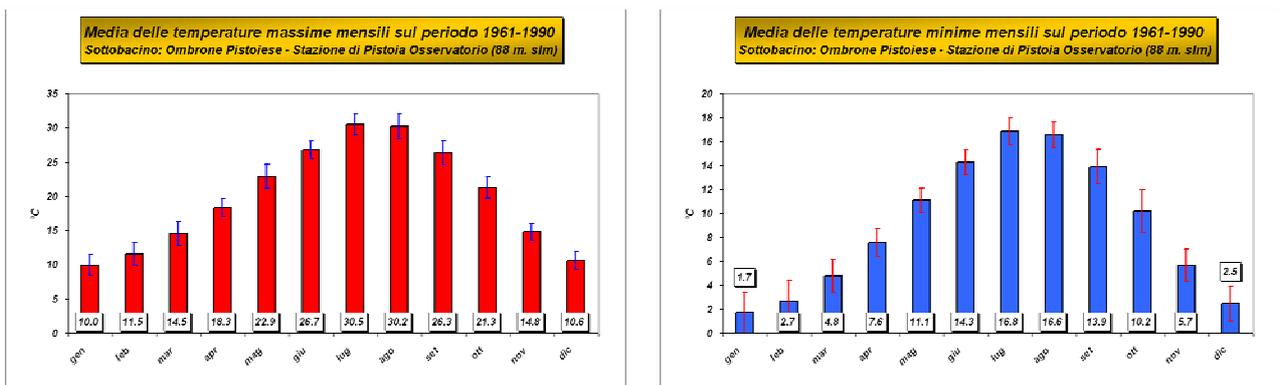


Fig. 14 – Sottobacino dell’Ombrone: media mensile delle temperature massime e minime, nel periodo 1961-1990

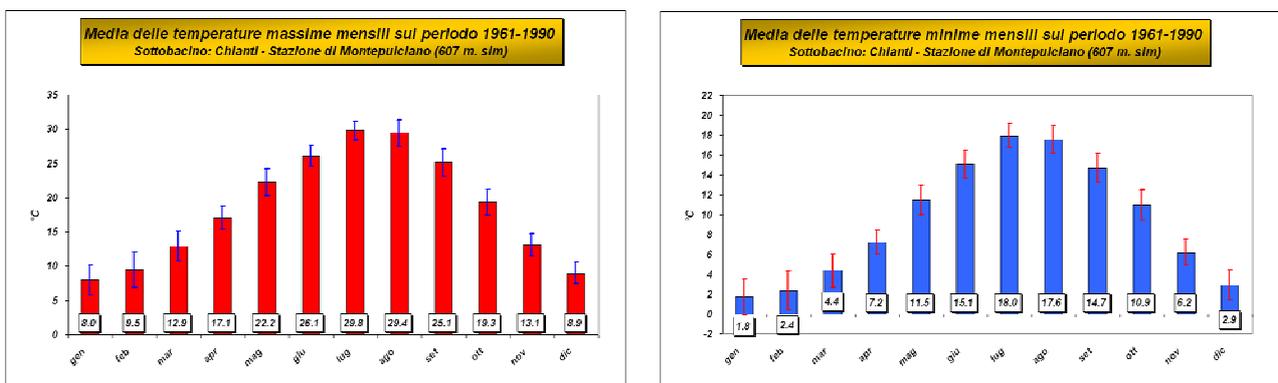


Fig. 15 – Sottobacini del Chianti: media mensile delle temperature massime e minime, nel periodo 1961-1990

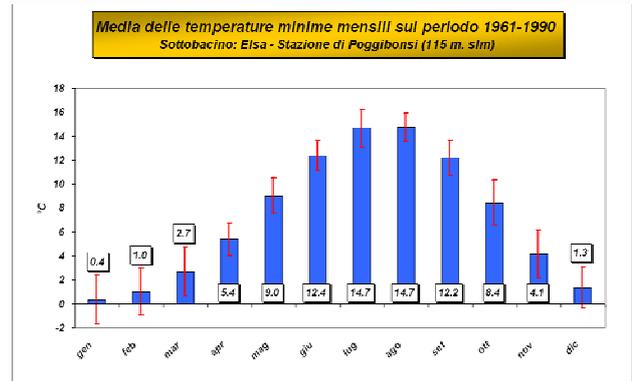
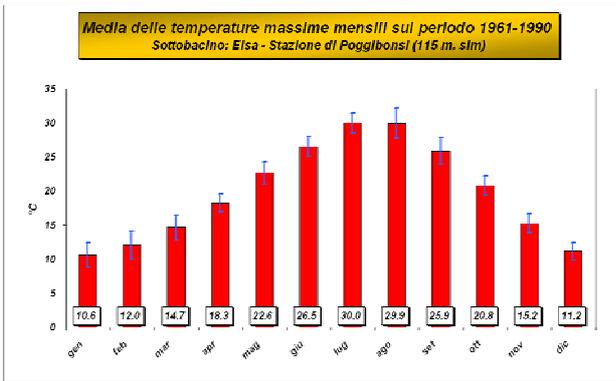


Fig. 16 – Sottobacino dell'Elsa: media mensile delle temperature massime e minime, nel periodo 1961-1990

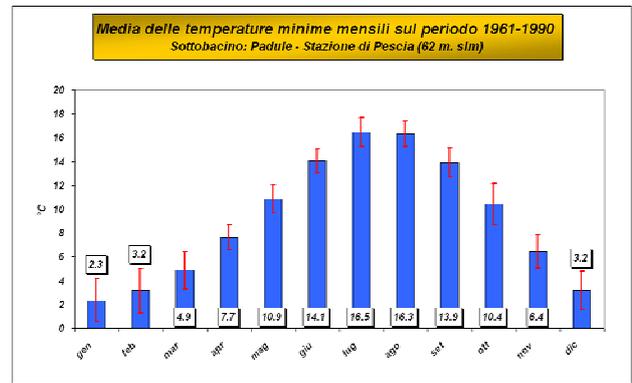
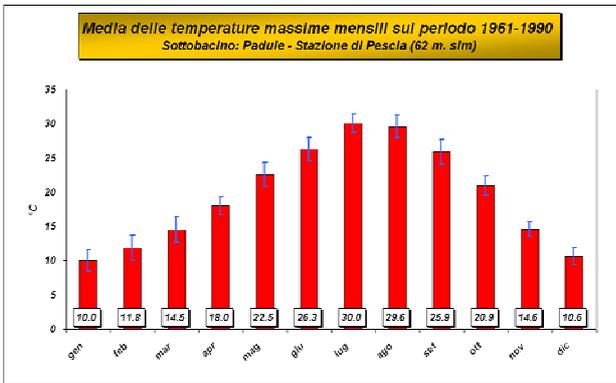


Fig. 17 – Sottobacino del Nievole: media mensile delle temperature massime e minime, nel periodo 1961-1990

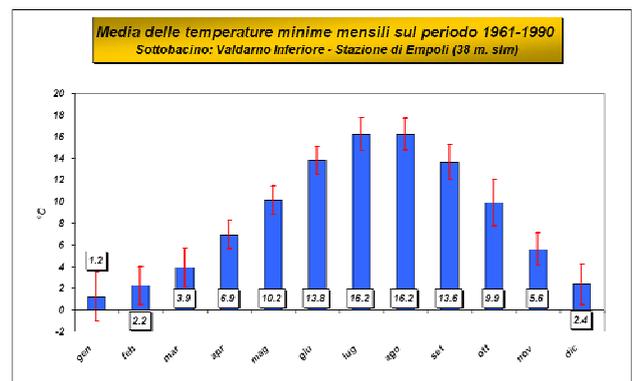
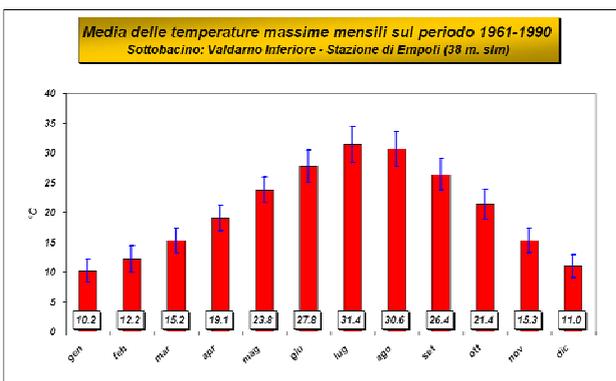


Fig. 18 – Sottobacino del Valdarno Inferiore: media mensile delle temperature massime e minime, nel periodo 1961-

1990

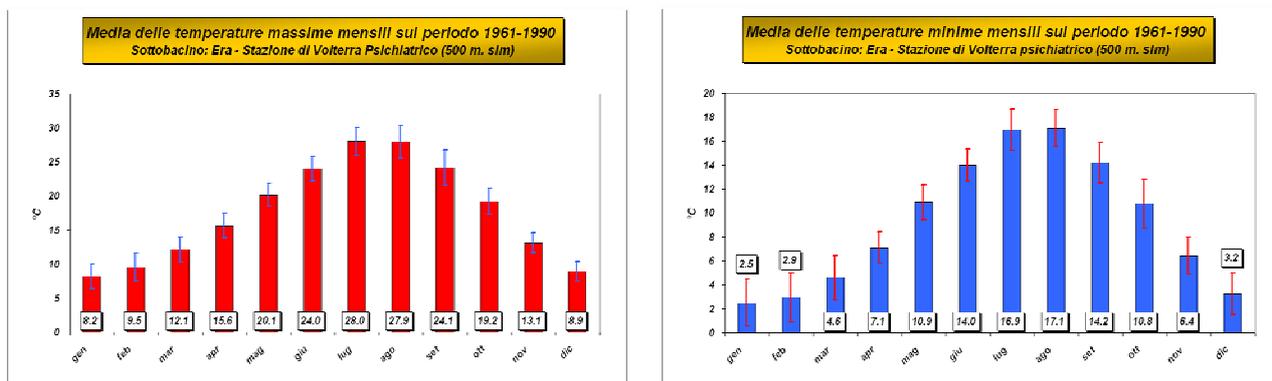


Fig. 19 – Sottobacino dell'Era: media mensile delle temperature massime e minime, nel periodo 1961-1990

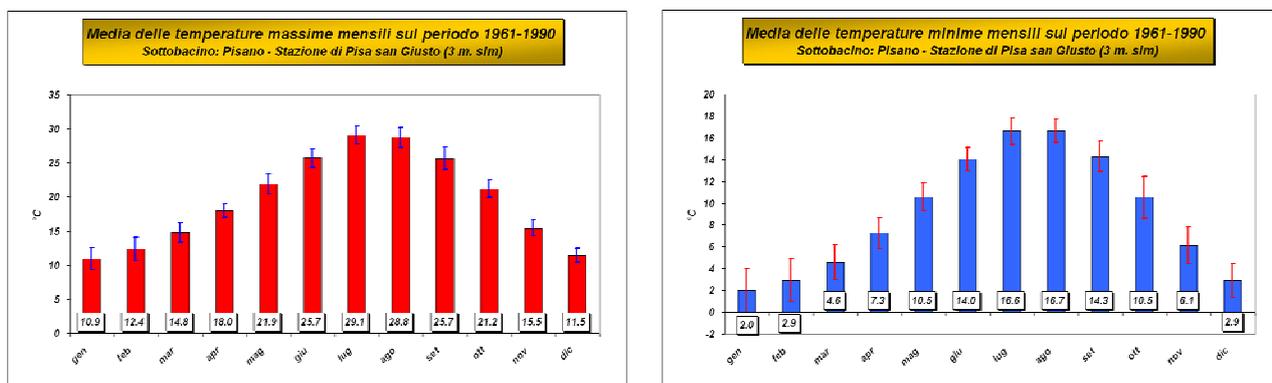


Fig. 20 – Area della Foce: media mensile delle temperature massime e minime, nel periodo 1961-1990



3. REGIME PLUVIOMETRICO

Il regime pluviometrico alla scala del Bacino del Fiume Arno è illustrato per mezzo della evoluzione delle medie mensili delle precipitazioni cumulate presso alcune stazioni appartenenti a diversi sottobacini, afferenti al periodo storico 1961-1990. I criteri di selezione delle stazioni sono stati quello della rappresentatività e della disponibilità, qualità e omogeneità nel tempo dei dati.

Nelle figure da Fig. 21 a Fig. 31 emerge il marcato picco autunnale, in particolare in Novembre, quando culmina la fase di ripresa delle precipitazioni dopo la scarsità estiva, molto rapida già nel mese di Settembre. Il secondo picco annuale si situa generalmente in Primavera, tra i mesi di Marzo e di Aprile, in particolare nelle aree relativamente lontane dai rilievi più importanti.

A ridosso dei rilievi Appenninici, invece, il picco primaverile segue a un periodo invernale abbastanza piovoso, in relazione ai processi di formazione della precipitazione orografica, per cui spesso è assente o poco rilevante.

Il minimo pluviometrico estivo, che invariabilmente si situa nel mese di Luglio, è inoltre più marcato nelle aree pianeggianti, vallive e prossime alla costa, che non sui rilievi.

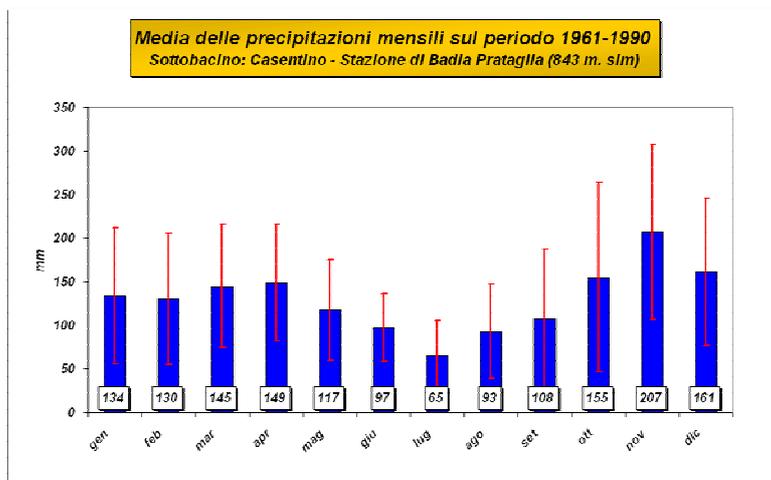


Fig. 21 Sottobacino del Casentino: media mensile della precipitazione, nel periodo 1961-1990

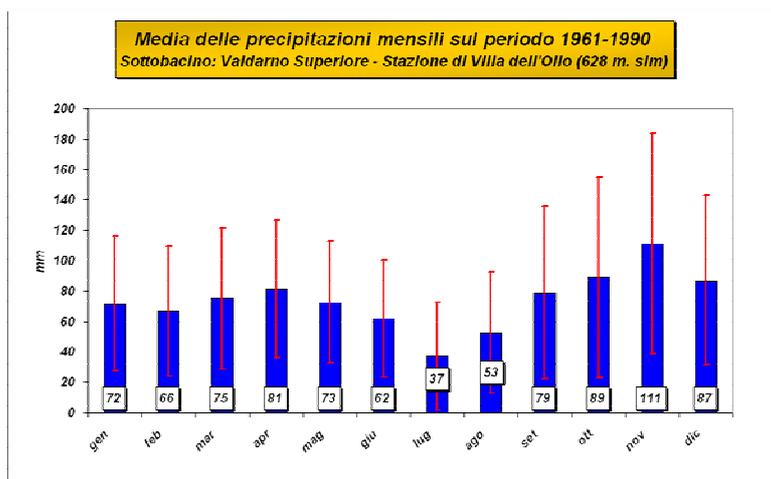


Fig. 22 – Sottobacino del Valdarno Superiore: media mensile della precipitazione, nel periodo 1961-1990

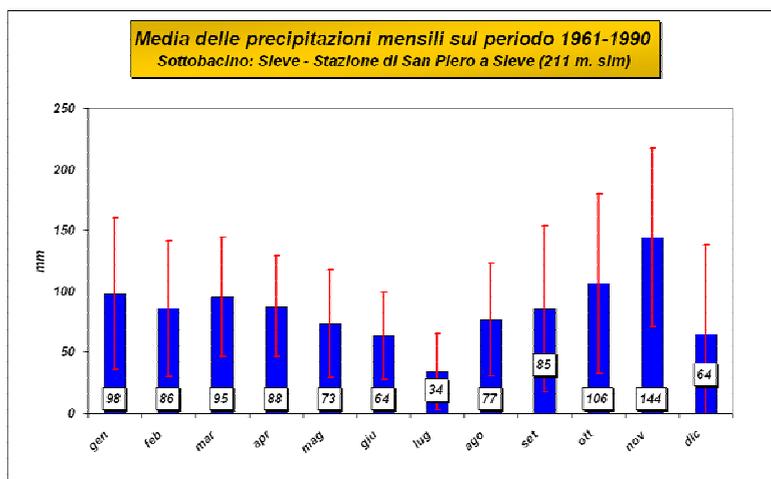


Fig. 11 – Sottobacino della Sieve: media mensile delle temperature massime e minime, nel periodo 1961-1990

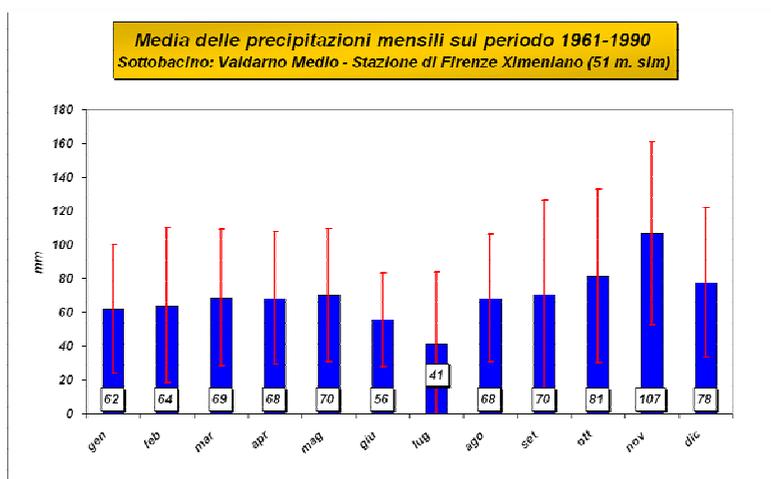


Fig. 23 – Sottobacino del Valdarno Medio: media mensile della precipitazione, nel periodo 1961-1990

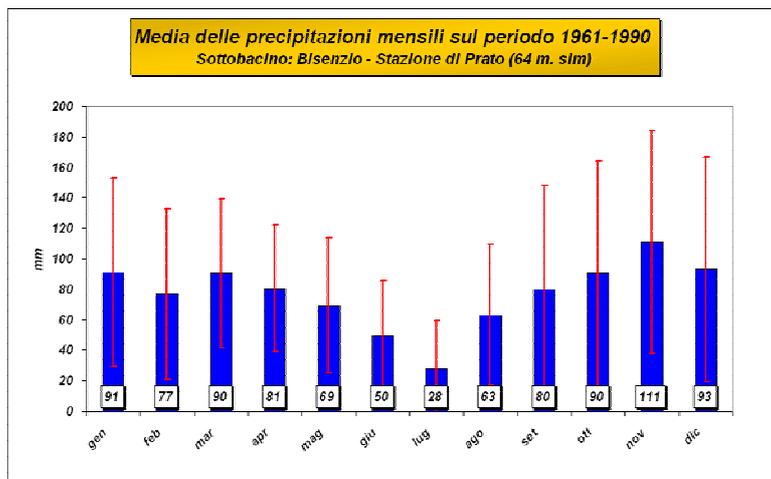


Fig. 24 – Sottobacino del Bisenzio: media mensile della precipitazione, nel periodo 1961-1990

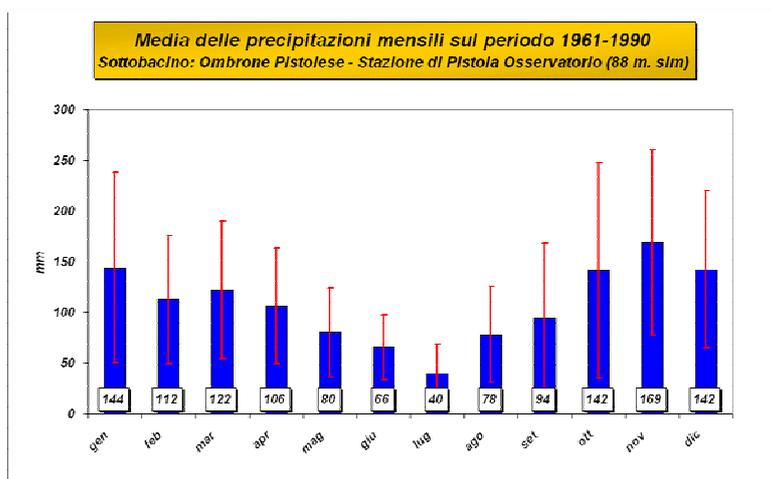


Fig. 25 – Sottobacino dell'Ombrone: media mensile della precipitazione, nel periodo 1961-1990

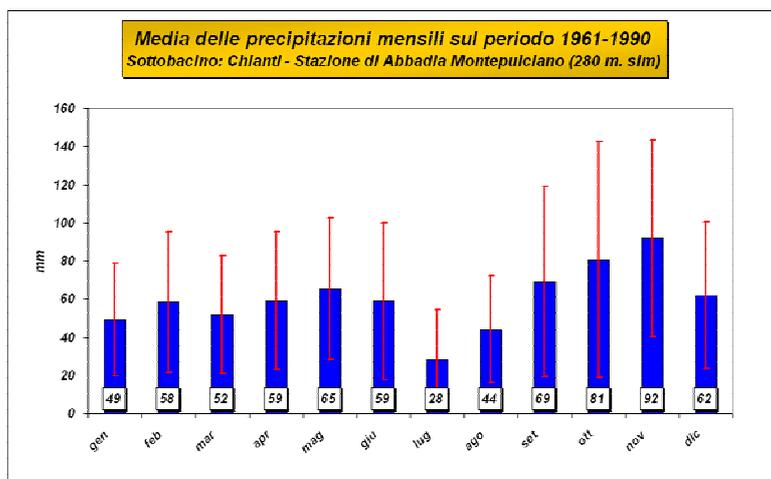


Fig. 26 – Sottobacini del Chianti: media mensile della precipitazione, nel periodo 1961-1990

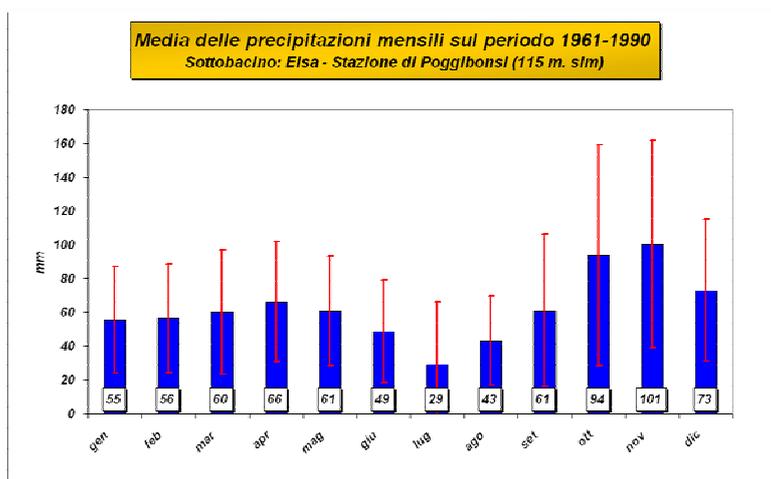


Fig. 27 – Sottobacino dell'Elsa: media mensile della precipitazione, nel periodo 1961-1990

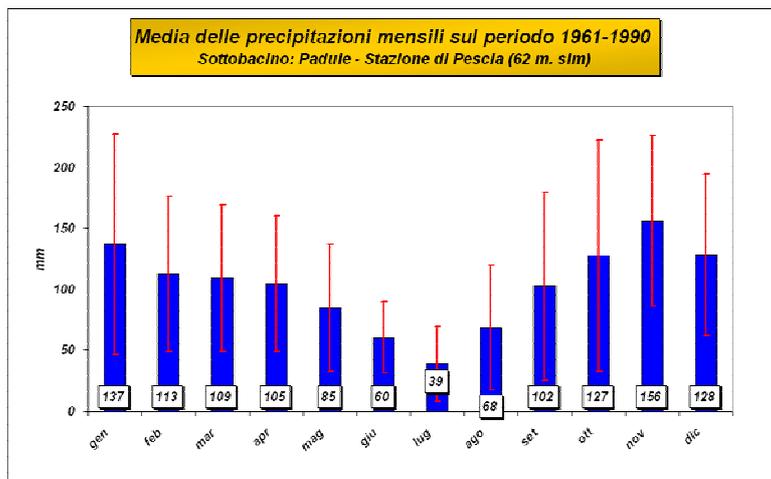


Fig. 28 – Sottobacino del Nievole: media mensile della precipitazione, nel periodo 1961-1990

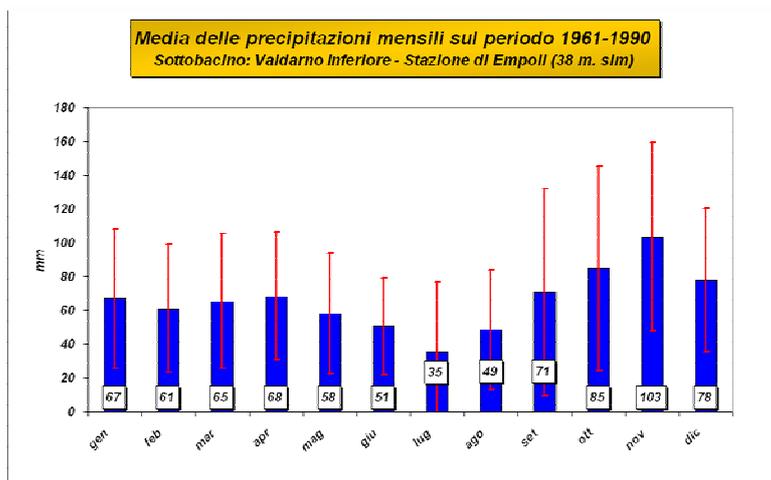


Fig. 29 – Sottobacino del Valdarno Inferiore: media mensile della precipitazione, nel periodo 1961-1990

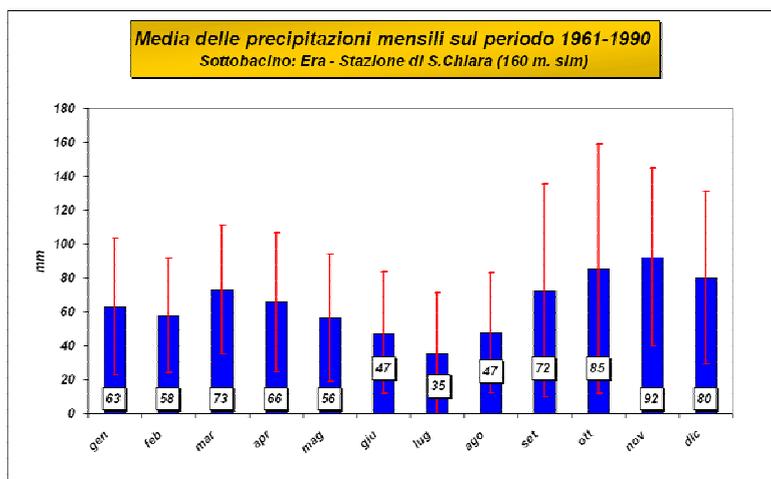


Fig. 30 – Sottobacino dell’Era: media mensile della precipitazione, nel periodo 1961-1990

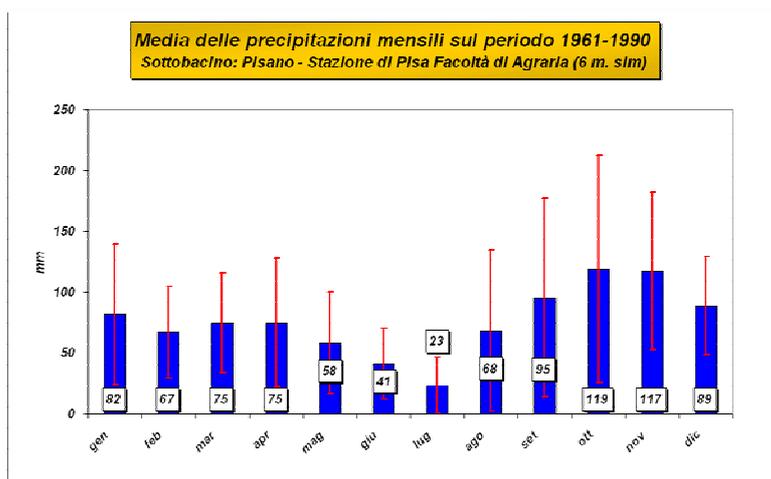


Fig. 31 – Area della Foce: media mensile della precipitazione, nel periodo 1961-1990



4. DESCRIZIONE SINTETICA DEL CLIMA FISICO

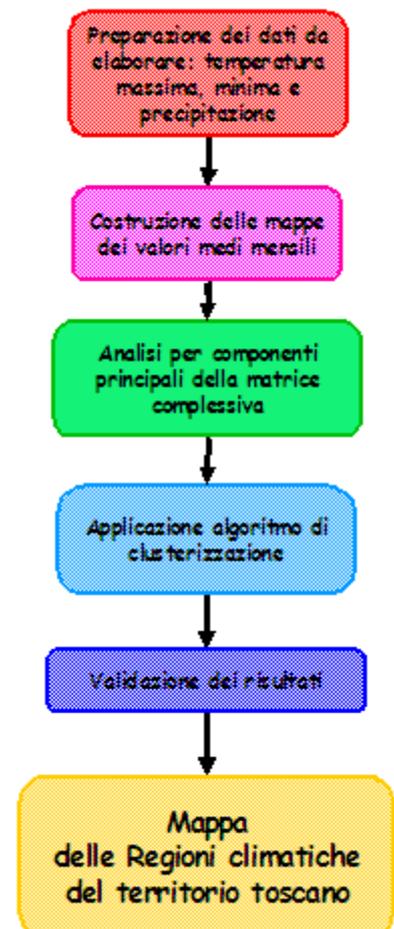
La caratterizzazione sintetica del clima fisico sul Bacino è illustrata per mezzo della regionalizzazione sul Bacino dell'Arno dei dati termo-pluviometrici osservati presso stazioni distribuite su un territorio più vasto, quindi nella individuazione ed estrazione di aree climaticamente omogenee (analisi cluster).

La tecnica di classificazione climatica adottata è di tipo quantitativo, cioè basata sull'analisi dei dati di temperatura e precipitazione registrati presso numerose stazioni meteorologiche site in Toscana.

In particolare, i parametri di temperatura massima e minima giornalieri e di precipitazione mensile registrati presso le singole stazioni meteorologiche sono stati elaborati al fine di ricavare il valore medio per ciascun mese nel periodo 1961-1990. Successivamente, i valori puntuali individuati sono stati regionalizzati sul territorio considerato, ottenendo mappe a risoluzione di 1 km. Applicando un'analisi per componenti principali sulle mappe in formato numerico, è stato possibile individuare il corpo fondamentale dell'informazione elaborata, e su questo applicare un algoritmo di analisi *cluster*, che ha permesso di definire le aree significativamente simili dal punto di vista statistico.

La procedura appena descritta presenta dunque una successione di passi, illustrati nel diagramma a fianco, che schematicamente possono essere riassunti come di seguito:

- preparazione dei dati da elaborare con valutazione della consistenza temporale e numerica delle grandezze esaminate: temperatura massima e minima e precipitazione giornaliera;
- costruzione delle mappe di distribuzione dei parametri meteorologici medi mensili mediante tecniche di spazializzazione dei dati puntuali (stazioni di misura);
- analisi per componenti principali delle mappe in formato numerico al fine di individuare i vettori descrittivi della maggior parte della varianza complessiva;





- applicazione di un algoritmo di analisi *cluster* ai risultati dell'analisi per componenti principali, al fine di individuare le aree significativamente simili in senso statistico, rispetto ai parametri di temperatura massima e minima e precipitazione;
- validazione dei risultati, mediante l'utilizzo di una procedura alternativa, compatibile con la precedente.

I parametri meteorologici utilizzati per la generazione di una classificazione climatica del territorio sono stati le temperature massime e minime giornaliere e le precipitazioni giornaliere. La scelta è legata sia all'importanza che questi hanno in riferimento alla descrizione del clima fisico presso la superficie, sia alla possibilità di reperire serie di misurazioni sufficientemente lunghe da rendere significativi i risultati dell'analisi. Per altri parametri non si trovano serie di osservazioni abbastanza lunghe da poter costituire una base completa per elaborazioni di carattere climatologico.

In seguito al controllo puntuale delle serie di temperatura massima, minima e precipitazione giornaliera, escludendo le stazioni con un numero di dati mancanti eccessivo ed eliminando gli errori di trascrizione (i dati in formato informatico derivano da trascrizioni di registrazioni manuali o di strumenti su supporto cartaceo), le stazioni prese in esame per il periodo di analisi, 1961-1990, sono risultate quelle elencate nelle tabelle seguenti.

Stazione	lat	lon	quota	tmax	tmin	prec
Acquerino	44	11.02	890	x	x	
Alberese_cas_idr	42.69	11.09	17	x	x	x
Arezzo_aeroporto	43.47	11.89	296	x	x	
Arezzo_san_fabiano	43.46	11.85	250	x	x	x
Arlia	44.27	10.12	385	x	x	x
Bagni_di_casciana	43.53	10.62	141	x	x	x
Bibbona	43.27	10.6	65	x	x	x
Borgo_san_lorenzo	43.96	11.39	193	x	x	x
Boscungo	44.14	10.67	1340	x	x	x



Stazione	lat	lon	quota	tmax	tmin	prec
Camaldoli	43.8	11.82	1111	x	x	x
Castel_di_pietra	42.96	11	56	x	x	x
Casteldelpiano	42.89	11.53	639	x	x	x
Castelmartini	43.82	10.83	23	x	x	x
Castelnuovo_Garfagnana	44.11	10.42	276	x	x	x
Consuma	43.79	11.59	950	x	x	x
Cortona	43.27	12	651	x	x	x
Elba_Calamita	42.75	10.38	396	x	x	x
Elba_Portoferraio	42.82	10.33	25	x	x	x
Empoli	43.71	10.99	38	x	x	x
Firenze_Peretola	43.81	11.2	34	x	x	x
Firenze_Ximeniano	43.78	11.26	51	x	x	x
Firenzuola	44.12	11.39	422	x	x	x
Grosseto_Aeroporto	42.76	11.11	8	x	x	x
Grosseto_s_i	42.75	11.03	3	x	x	x
Larderello	43.24	10.88	400	x	x	x
Livorno	43.55	10.31	3	x	x	x
Lucca	43.84	10.51	20	x	x	x
Massa_Marittima	43.05	10.89	370	x	x	x
Massa	44.03	10.15	65	x	x	x
Monteoliveto	43.18	11.54	401	x	x	x
Montepulciano	43.09	11.78	607	x	x	x



Stazione	lat	lon	quota	tmax	tmin	prec
Mutigliano	43.89	10.48	62	x	x	x
Noverino	44.2	9.93	55	x	x	x
Nugola	43.58	10.44	69	x	x	x
Orbetello	42.43	11.2	1	x	x	x
Palazzo_del_Pero	43.42	11.97	406	x	x	x
Passo_Cisa	44.43	9.93	1039	x	x	x
Pescia	43.91	10.69	62	x	x	x
Pienza	43.08	11.68	499	x	x	x
Pieve_S_Stefano	43.67	12.03	431	x	x	x
Pisa_San_Giusto	43.69	10.4	3	x	x	x
Pistoia_osserv	43.95	10.91	88	x	x	x
Poggibonsi	43.47	11.16	115	x	x	x
Pontremoli	44.37	9.88	215	x	x	x
Prato	43.89	11.1	64	x	x	x
Pratolungo	42.7	11.77	374	x	x	x
Retignano	44.01	10.27	440	x	x	x
San_Donato	42.53	11.22	19	x	x	x
San_Marcello_Pistoiese	44.06	10.79	625	x	x	x
Sansepolcro	43.57	12.08	330	x	x	x
Santa_Fiora	42.83	11.58	687	x	x	x
Siena	43.32	11.31	348	x	x	x
Stia	43.8	11.71	479	x	x	x



Stazione	lat	lon	quota	tmax	tmin	prec
Suvereto	43.08	10.68	112	x	x	x
Viareggio	43.88	10.24	3	x	x	X
Vigna_di_Valle	42.08	12.22	262	x	x	
Volterra_psichiatrico	43.41	10.87	500	x	x	

Tabella 1. – Stazioni utilizzate nella classificazione climatica del territorio del Bacino dell’Arno

La distribuzione sul territorio delle singole stazioni è illustrata per mezzo di due mappe, una per le temperature e l’altra per le precipitazioni.

Si può osservare una buona copertura del Bacino dell’Arno e anche della Toscana che, abbinata alla consistenza temporale e numerica delle serie osservate, permette di effettuare correttamente la “zonizzazione climatica” del territorio.

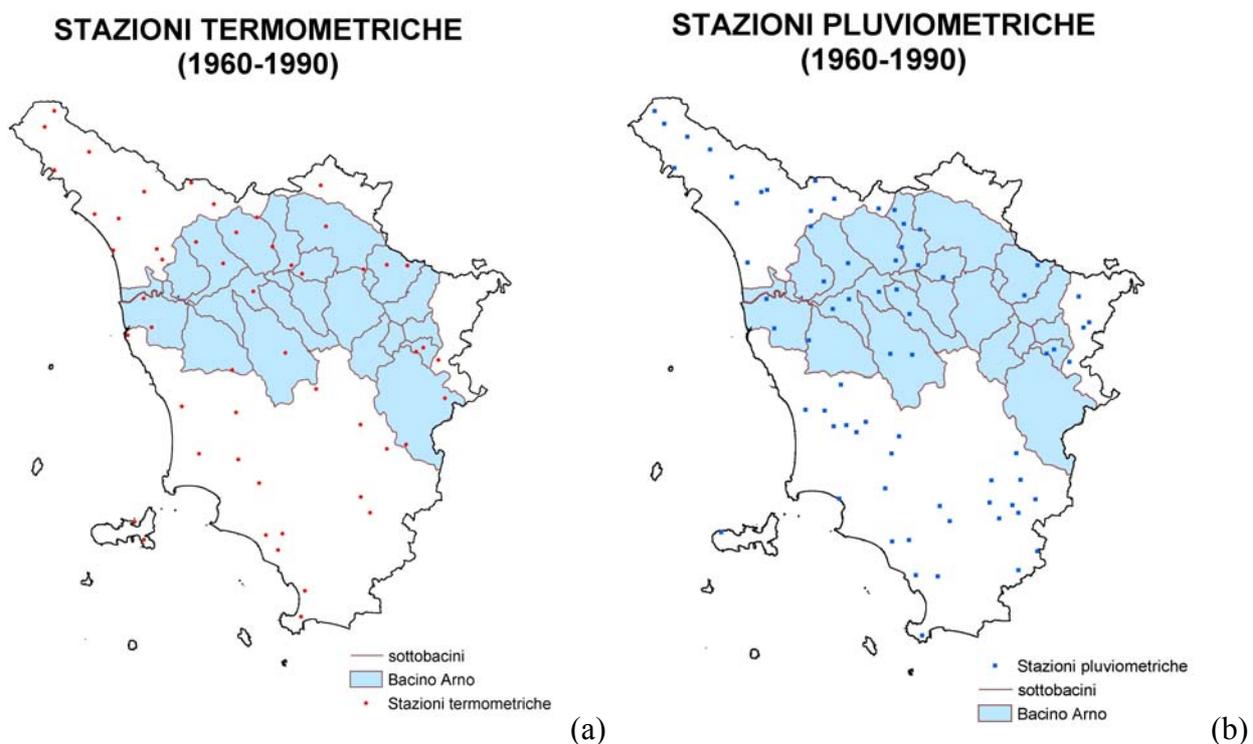


Fig. 32 – Stazioni dotate di dati termometrici (a) e pluviometrici (b), impiegate per la descrizione delle aree climaticamente omogenee nel periodo 1961-1990

Una volta individuate le stazioni meteorologiche e le relative misurazioni giornaliere, sono state calcolate le medie mensili per l'intero arco temporale coperto, 30 anni, per ciascun parametro utilizzato: temperatura massima e minima e precipitazione cumulata mensile.

La base di dati consiste quindi in dodici valori per ciascun parametro esaminato, temperatura massima, temperatura minima e precipitazione cumulata, per ogni stazione meteorologica presa in esame.

Il passo successivo consiste nella creazione di mappe della distribuzione spaziale delle grandezze sul territorio Toscano.

Sono state ricavate per le trentasei grandezze desunte dalle serie storiche registrate presso le singole stazioni meteorologiche (12 medie mensili per tre parametri, temperatura massima e minima giornaliera e precipitazione cumulata) altrettante mappe rappresentative della variabilità di ciascun parametro sul territorio, che nel caso corrente corrisponde alla Regione Toscana. La selezione della procedura di "spazializzazione" è stata eseguita in modo tale da ottenere il miglior accordo con i dati osservati, evitando di amplificare gli errori per effetto di operatori di tipo non lineare.

E' stata adottata una procedura di multiregressione lineare su una serie di parametri che influenzano la varianza, temporale e spaziale, di ciascuna grandezza meteorologica. La scelta dei parametri è caduta sulle coordinate geografiche, la quota sul livello del mare, la distanza dal mare e la distanza dai fiumi. Rispetto ai classici lavori consultabili nella letteratura scientifica, l'aggiunta delle distanze dai corpi d'acqua principali, dunque il mare e i fiumi, alla sola combinazione delle coordinate geografiche con l'altezza sul livello del mare, ha permesso di spiegare in modo più completo la varianza delle diverse quantità meteo-climatiche sul territorio.

Nello specifico, nel presente progetto è stata adottata una griglia con maglia uniforme di lato pari a 500 metri, ottenendo così oltre 250.000 punti rappresentativi del territorio, classificati con il parametro di interesse: 36 parametri per ogni nodo della griglia.

L'elevato numero di dimensioni è stato quindi ridotto per mezzo dell'Analisi in Componenti Principali (ACP), in cui si è scelto di conservare le prime quattro componenti, combinazioni lineari delle 36 variabili in gioco, in grado da sole di spiegare oltre l'80% della varianza della distribuzione spaziale della temperatura minima e massima e della precipitazione.



Su questa nuova matrice, in cui il clima mensile di ogni nodo della griglia è descritto per mezzo di un vettore a 4 dimensioni, è stata infine eseguita un'analisi *cluster* di tipo “non gerarchico”, che ha permesso di ricavare la suddivisione finale in regioni climatiche del territorio Regionale, da cui è stata estratta infine la classificazione climatica territoriale del Bacino dell'Arno.

Sotto il nome *Cluster Analysis* (letteralmente “analisi dei grappoli”) vengono raccolte un insieme di tecniche statistiche che presentano il comune obiettivo di effettuare raggruppamenti di unità statistiche in base alla similarità del loro profilo, descritto da un insieme di variabili. I gruppi risultanti saranno caratterizzati da un elevato grado di omogeneità interna, mentre i vari gruppi risultano tra loro molto differenti.

E' stato scelto di rappresentare il territorio del Bacino del Fiume Arno in 12 classi diverse, che soggettivamente appariva il compromesso ottimale tra completezza dell'informazione e leggibilità della mappa risultante.

Il risultato finale, in cui le aree climaticamente omogenee sono descritte in base alla più ampia classificazione del territorio Toscano, è costituito dalla mappa riportata in Fig. 33. Emerge una profonda dipendenza dalla quota, com'è ovvio, ma anche dalla distanza dal mare, quindi dal grado di *continentalità*, dalla conformazione topografica locale e, parzialmente, dalla latitudine.



ZONIZZAZIONE CLIMATICA Bacino del Fiume Arno



Fig. 33 - Mappa della zonizzazione climatica del Bacino dell'Arno – 12 classi climatiche e 5 parametri per la spazializzazione della temperatura e della precipitazione (Coordinate geografiche UTM, quota, distanza dal mare, distanza dai fiumi)



1. VARIABILITA' E TENDENZE CLIMATICHE

5.1. La scala globale

Tra i moltissimi indicatori delle trasformazioni climatiche globali, anche sulla limitata area continentale Europea e Mediterranea, selezioniamo alcuni campi molto significativi: la pressione al livello del mare e l'intensità delle perturbazioni, rappresentativi della circolazione atmosferica.

Le Fig. 35(a-n) contribuiscono ad illustrare la variabilità della circolazione atmosferica osservata nel passato, per mezzo dei campi medi della pressione al livello del mare nei ventenni 1961-1980 e 1981-2000, e della differenza dei campi medi della intensità delle perturbazioni negli stessi due ventenni, in ciascuna stagione dell'anno.

In Inverno (Fig. 35a-c), è stata osservata una significativa intensificazione del flusso sud-occidentale umido di origine Atlantica, diretto verso l'Europa centro-settentrionale, e una simultanea intensificazione ed espansione verso l'Europa meridionale dell'anticiclone del medio Atlantico, con un aumento della pressione sull'Italia, situazione che si riflette nella intensificazione delle perturbazioni oltre i 48°N, e una diminuzione corrispondente a latitudini inferiori.

In Primavera (Fig. 35d-f), le variazioni climatiche sono state molto più contenute, limitandosi a un indebolimento del flusso occidentale sul Nord Europa e ad un debole aumento della pressione sul Mediterraneo centro-occidentale; anche il campo della intensità delle perturbazioni si è modificato solo marginalmente, aumentando leggermente alle latitudini del Sud Europa, diluendo appena intorno alle Isole Britanniche e intensificandosi invece in maggior misura tra le coste orientali Canadesi e la Norvegia.

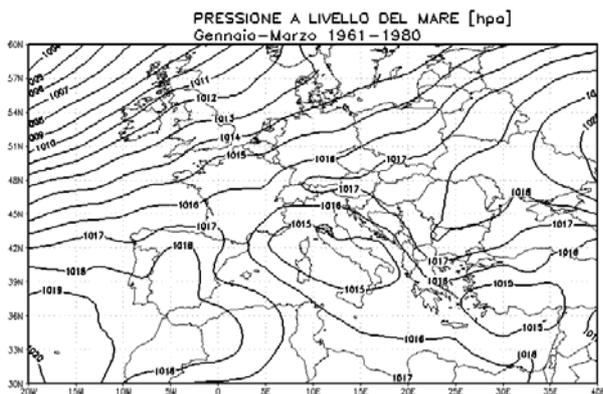
In Estate (Fig. 35g-i), si osserva l'espansione dell'anticiclone sub-tropicale dell'Atlantico verso l'Europa centrale, mentre il percorso e l'intensità delle perturbazioni subiscono una variazione significativa soltanto a latitudini molto settentrionali, oltre i 57°N.

In Autunno (Fig. 35l-n), si osserva l'intensificazione del flusso umido Atlantico sull'Europa centro-settentrionale, che va interessando latitudini sempre più meridionali, fino a lambire l'Arco Alpino; un minimo barico secondario interessa direttamente l'Italia. In accordo con questa situazione, le perturbazioni si sono fatte più vigorose su un'ampia area del dominio considerato, in particolare



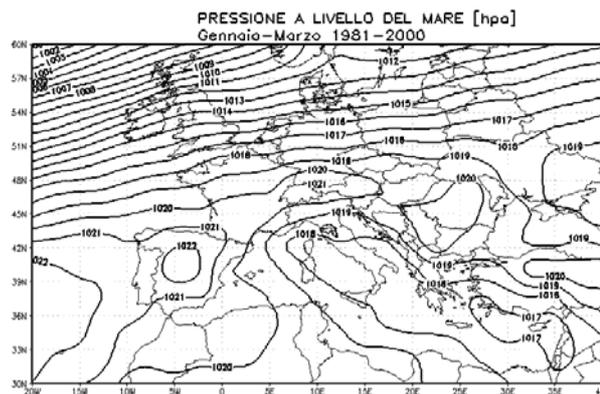
sulle medie latitudini dell'Atlantico, ma anche su gran parte dell'Europa centrale e orientale, e sul Mediterraneo centro-occidentale.

NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBimet-C.N.R.



(a)

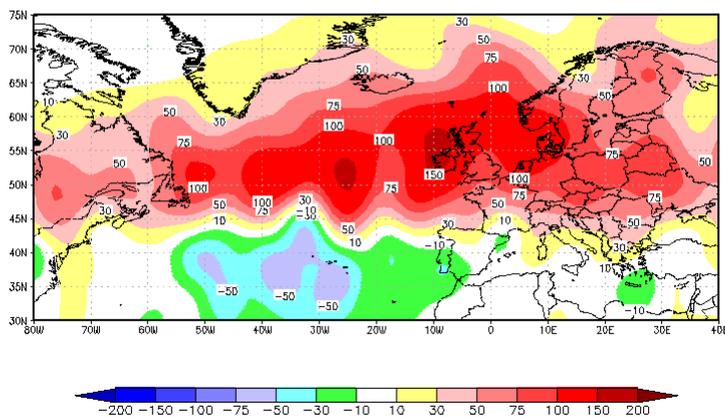
NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBimet-C.N.R.



(b)

NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBimet-C.N.R.

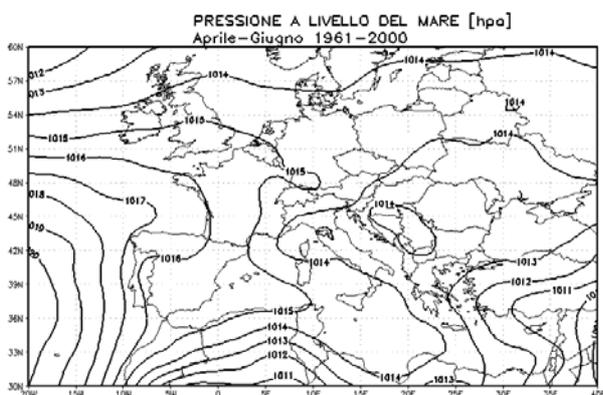
STORM TRACK [m²/s²]
Gennaio-Marzo (1981-2000)-(1961-1980)



(c)

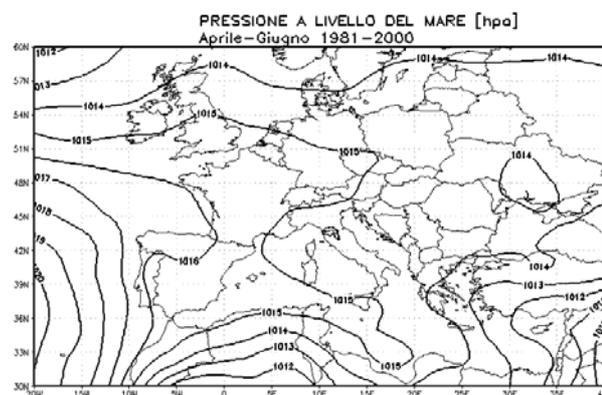


NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBmet-C.N.R.



(d)

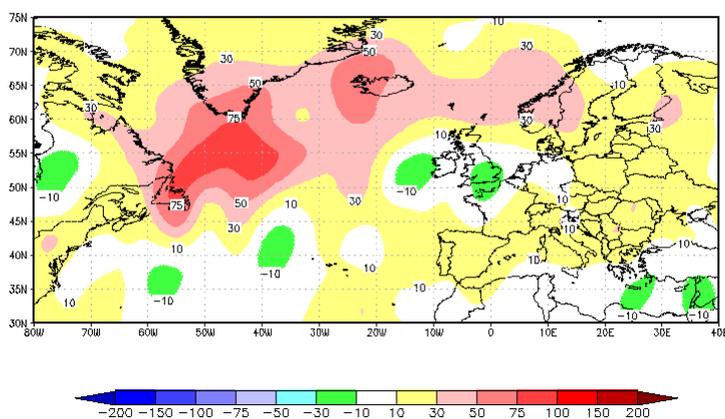
NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBmet-C.N.R.



(e)

NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBmet-C.N.R.

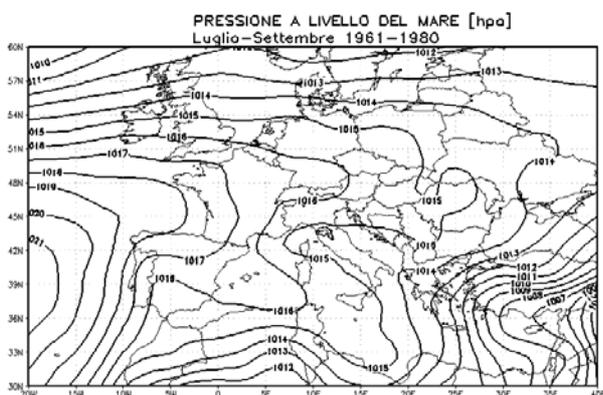
STORM TRACK [m2/s2]
Aprile-Giugno (1981-2000)-(1961-1980)



(f)

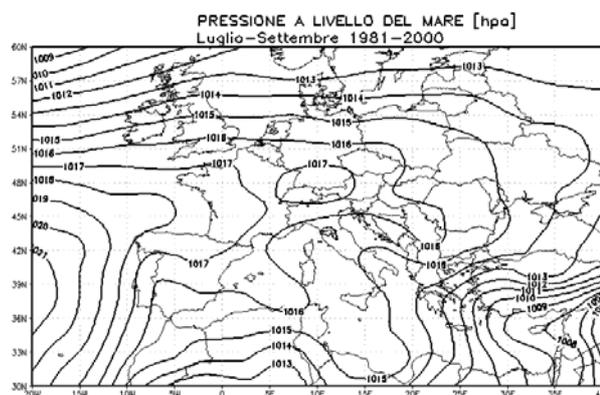


NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBimet-C.N.R.



(g)

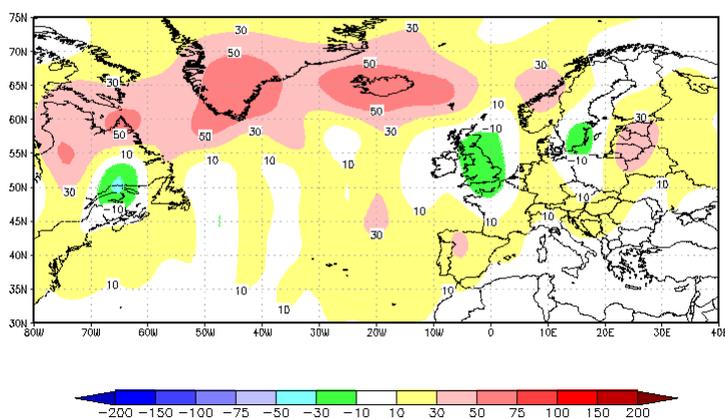
NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBimet-C.N.R.



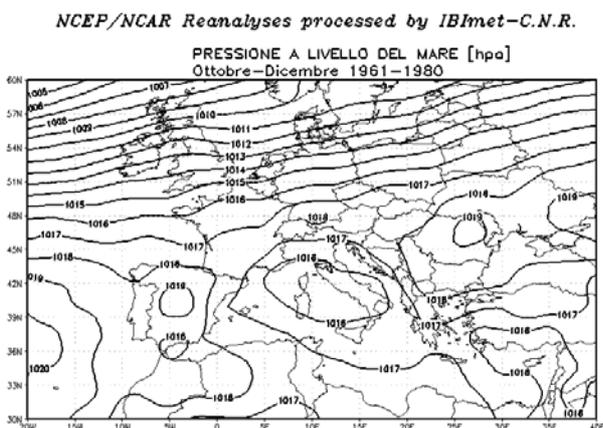
(h)

NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBimet-C.N.R.

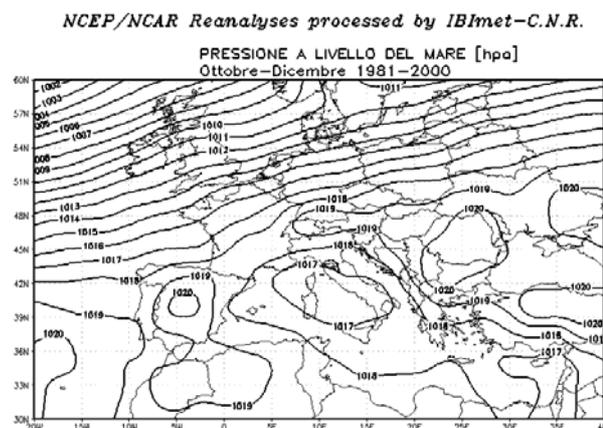
STORM TRACK [m2/s2]
Luglio-Settembre (1981-2000)-(1961-1980)



(i)



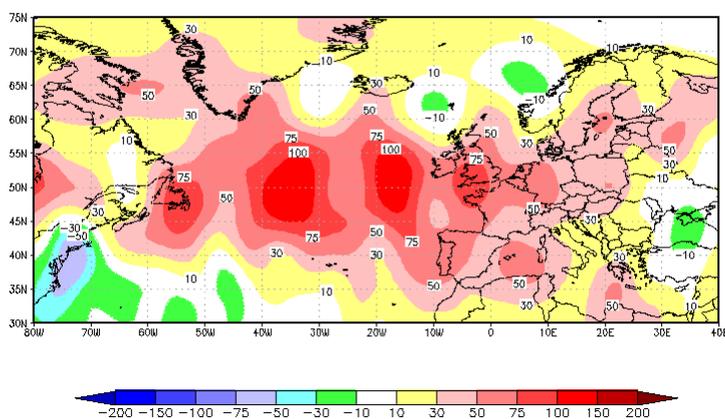
(l)



(m)

NCEP/NCAR Reanalyses processed by IBimet-C.N.R.

STORM TRACK [m2/s2]
Ottobre-Dicembre (1981-2000)-(1961-1980)



(n)

Fig. 35 – Trasformazioni della circolazione atmosferica osservate nel passato, per mezzo dei campi medi della pressione al livello del mare nei ventenni 1961-1980 e 1981-2000, e della differenza dei campi medi della intensità delle perturbazioni negli stessi due ventenni, in ciascuna stagione dell'anno



5.2. Trasformazioni climatiche regionali e locali

L'analisi della variabilità del clima fisico locale sul Bacino del Fiume Arno è stata condotta per mezzo di serie storiche sia raccolte presso stazioni di misura, sia derivate da grandi database.

La Fig. 36 illustra le trasformazioni osservate nel recente passato della temperatura media annuale e stagionale, derivate dalle Rianalisi NCEP-NCAR. A livello annuale, la temperatura è aumentata di circa 1°C dalla fine degli anni '70 del secolo scorso, così come in Primavera, Estate e Autunno, mentre in Inverno l'inizio della fase di riscaldamento risale alla metà degli anni '80. La temperatura, si osserva, è salita in maggior misura in Primavera e in Estate e meno in Autunno.

Queste tendenze sono confermate, in Fig. 37, dalle serie annuale e stagionali tratte dalle osservazioni presso la stazione di Camaldoli (AR), lontanissima da centri abitati e immutata nel periodo in considerazione.

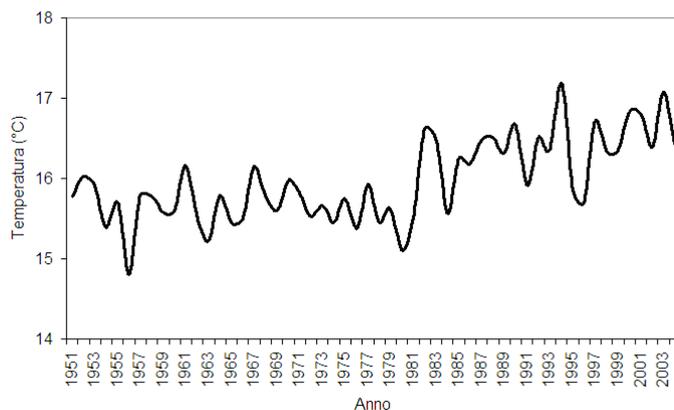
L'evoluzione storica della precipitazione è più complessa: in Fig. 38 sono illustrate le serie annuale e stagionali per il sotto-Bacino del Casentino, derivata dai dati misurati presso le stazioni di Camaldoli e Stia, la serie osservata presso Firenze Ximeniano, e la serie, molto più breve, disponibile nel database globale su griglia regolare del Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), estratta sull'area del Bacino dell'Arno.

La precipitazione annuale appare, nei recenti decenni, in calo sul Casentino, quindi sulla parte più alta del Bacino, in lieve diminuzione negli ultimi due decenni anche in base ai dati GPCC, ma risulta pressoché stazionaria a Firenze. Gran parte della diminuzione della piovosità è legata alla stagione Invernale, fenomeno rilevato anche presso Firenze, e che tuttavia pare essersi arrestata alla metà degli anni '90. In Primavera e in Estate, invece, si osserva un contenuto aumento delle precipitazioni fino all'inizio degli anni '90, seguito da un calo che ha riportato le precipitazioni su valori prossimi o inferiori a quelli di 30-40 anni prima. In Autunno, con una marcata variabilità inter-annuale, si osserva in media una diminuzione delle precipitazioni, più rilevante sul sotto-Bacino del Casentino.

In generale, le precipitazioni sono diminuite, nel recente periodo, sulle zone più interne del Bacino, rimanendo quasi stazionarie sulle zone centrali, e stazionarie oppure in leggero aumento presso le aree costiere, coerentemente con la diminuzione delle perturbazioni e del flusso di aria umida, nonché con l'aumento della instabilità potenziale, di origine termica, sul mare e sulle aree costiere.

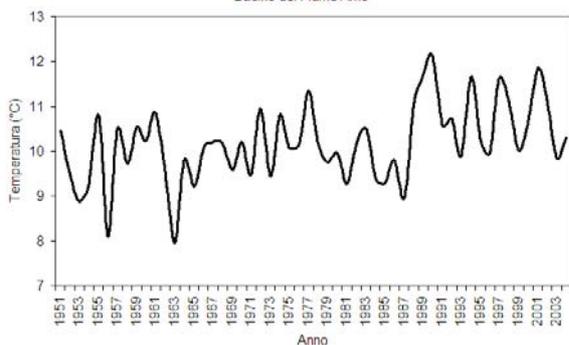


Temperatura Superficiale dell'aria - media Annuale
Bacino del Fiume Arno



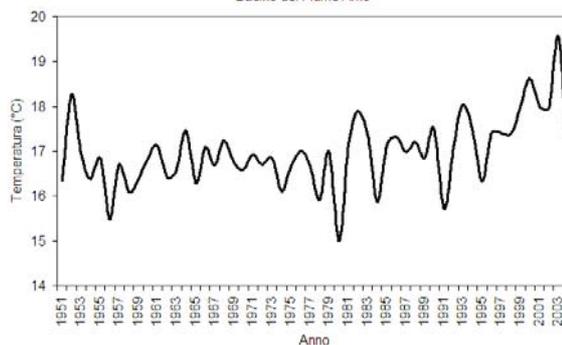
(a)

Temperatura Superficiale dell'aria in Inverno (Gennaio-Marzo)
Bacino del Fiume Arno



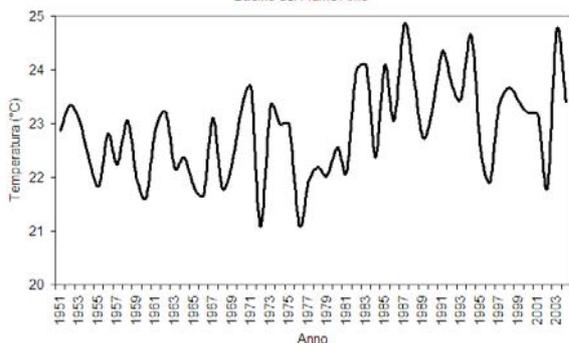
(b)

Temperatura Superficiale dell'aria in Primavera (Aprile-Giugno)
Bacino del Fiume Arno



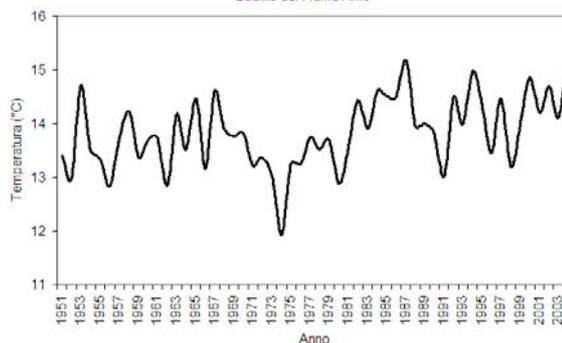
(c)

Temperatura Superficiale dell'aria in Estate (Luglio-Settembre)
Bacino del Fiume Arno



(d)

Temperatura Superficiale dell'aria in Autunno (Ottobre-Dicembre)
Bacino del Fiume Arno



(e)

Fig. 36 – Evoluzione della temperatura dell'aria presso la superficie sul Bacino dell'Arno (fonte: Rianalisi NCEP-NCAR): media annuale, medie stagionali

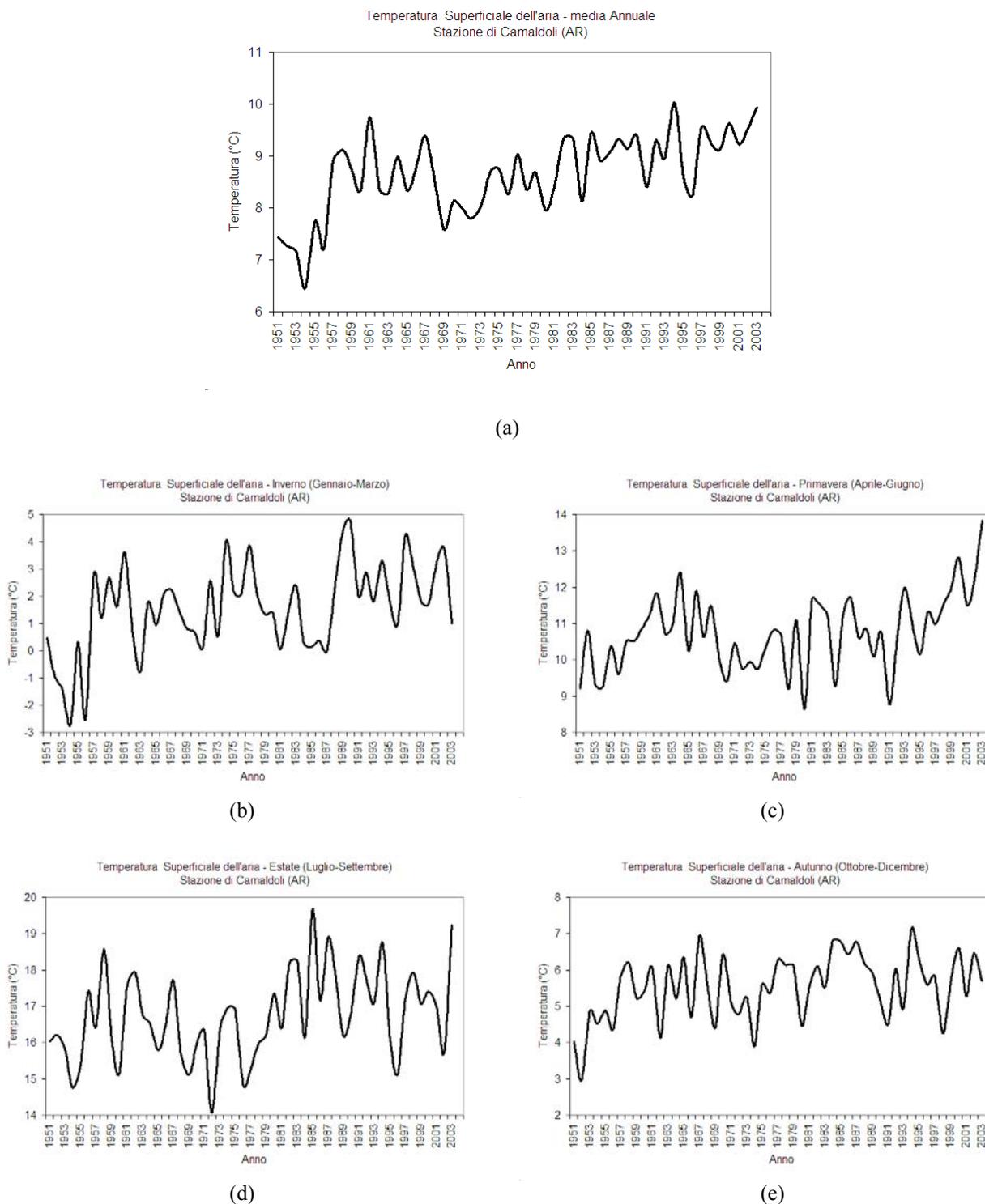
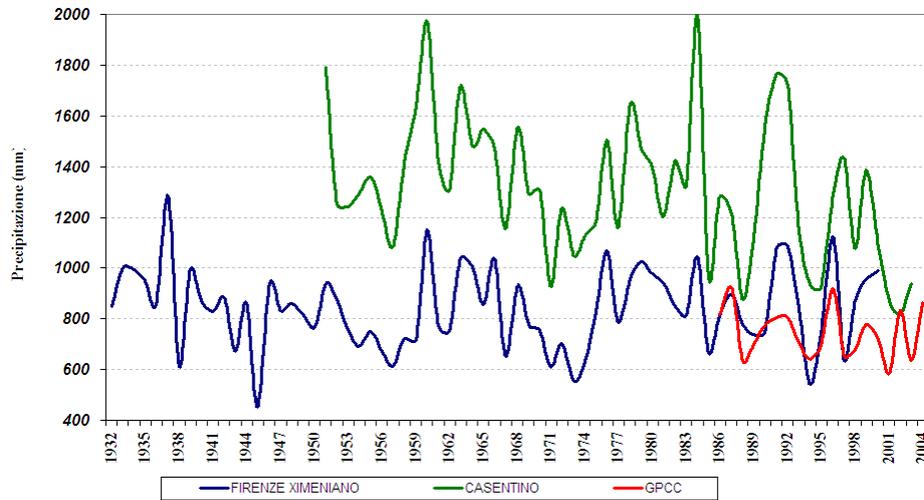


Fig. 37 – Evoluzione della temperatura dell'aria misurata presso la stazione di Camaldoli (AR): media annuale, medie stagionali

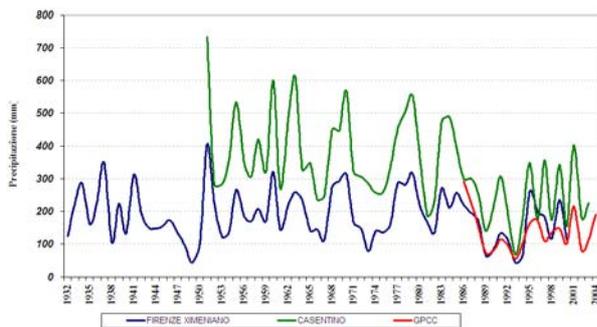


PRECIPITAZIONE ANNUALE



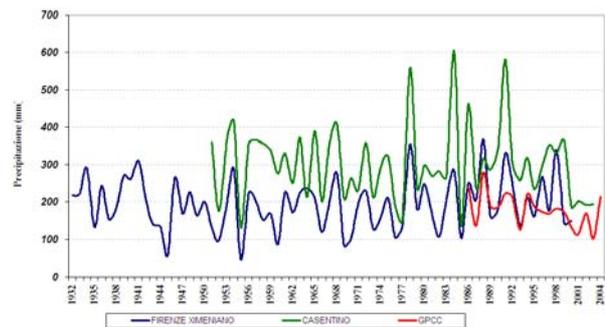
(a)

PRECIPITAZIONE INVERNALE (GENNAIO-MARZO)



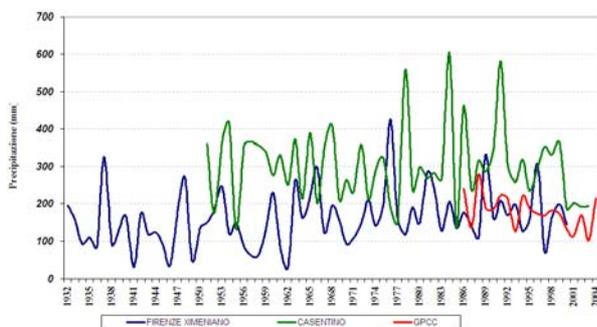
(b)

PRECIPITAZIONE PRIMAVERILE (APRILE-GIUGNO)



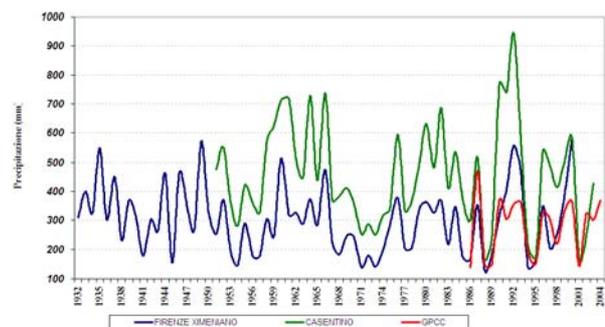
(c)

PRECIPITAZIONE ESTIVA (LUGLIO-SETTEMBRE)



(d)

PRECIPITAZIONE AUTUNNALE (OTTOBRE-DICEMBRE)



(e)

Fig. 38 – Evoluzione della precipitazione cumulata nell'anno e nelle stagioni, presso Firenze Ximeniano, media sul Bacino del Casentino in base a dati locali, media sul Bacino dell'Arno dalla fonte GPCC



2. RISCHIO DI SICCAITA'

Il rischio corrente di siccità sul Bacino dell'Arno è illustrato per mezzo di due tecniche:

- Mappe di aridità sull'intero Bacino, afferenti allo stato corrente del rischio e alle trasformazioni passate;
- Speciali diagrammi, afferenti ai *cluster* individuati e rappresentati in precedenza, detti Termoudogrammi di Bagnouls, afferenti ancora allo stato passato del rischio;
- Ulteriori termoudogrammi, afferenti ad alcune stazioni rappresentative, in grado di evidenziare il grado di trasformazione del rischio di aridità nel passato e nel futuro, nell'ultimo caso per mezzo della riduzione di scala degli scenari climatici.

6.1. Mappe di aridità

Esiste una lunga serie di indicatori di aridità, i quali partono tutti dal presupposto che la quantificazione del fenomeno sia ben rappresentata dal rapporto tra precipitazioni ed evapotraspirazione.

Le differenze principali si riferiscono al secondo parametro, visto che la determinazione dell'evapotraspirazione è legata ad un insieme di fattori non sempre facilmente calcolabili o uniformemente registrati sul territorio.

Tra le equazioni che meglio stimano l'ETP (Evapotraspirazione Potenziale) le più note ed utilizzate sono l'equazione empirica di Thornthwaite e quella basata su parametri fisici di Penman-Monteith.

La seconda è più rispondente alla realtà soprattutto per i climi umidi e temperati, mentre la prima sottostima l'ETP nelle zone più aride.

La formula di Penman-Monteith, però, richiede la disponibilità di dati relativi a fattori che sono registrati in un numero di stazioni meteorologiche molto limitato e non sufficiente per ottenere una rappresentazione dell'evapotraspirazione su tutto il territorio del Bacino dell'Arno:

$$ET = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{t + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}$$



Dove:

ETP = evapotraspirazione (mm/giorno);

R_n = radiazione netta (MJm⁻² giorno⁻¹);

G = flusso di calore del sole (MJm⁻² giorno⁻¹);

t = temperatura media giornaliera (°C);

u = velocità del vento a 2 m dal suolo (m/sec);

e_s = pressione di vapore saturo dell'acqua (kPa);

e_a = pressione attuale di vapore dell'acqua (kPa);

Δ = pendenza della curva della pressione di vapore (kPa°C⁻¹);

γ = costante psicometrica (kPa°C⁻¹).

Il metodo di Thornthwaite, basato essenzialmente sulla temperatura, può invece disporre di basi di dati molto più consistenti e omogeneamente distribuiti:

$$ETP = 16 \cdot c \cdot \left(T \cdot \frac{10}{I} \right)^a$$

$$a = 0.49239 + 1.792 \text{ E-}2 * I + 7.711 \text{ E-}5 * I^2 + 6.75 \text{ E-}7 * I^3$$

$$c = h_{\text{lucce}} / 12, \quad I = \sum_{i=1.12} (T_i / 5)^{1.514}$$

dove:

ETP = Evapotraspirazione potenziale media mensile (mm di acqua persi per evaporazione dal suolo e traspirazione della vegetazione);

T = temperatura media del i-esimo mese (°C);

I = indice di calore annuo;

a = fattore di correzione di Thornthwaite;

c = fattore di correzione per le ore di illuminazione mensile;



h = media delle ore di illuminazione mensile.

La scelta per la determinazione dell'Indice di Aridità rappresentativo per il Bacino dell'Arno, quindi, è caduta sull'utilizzo della metodologia di Thornthwaite, utilizzando, però, l'equazione di Penman-Monteith per il calcolo di un "fattore di correzione", sperimentato nell'ambito del Progetto internazionale DESERTNET¹, in cui si proponeva lo stesso tipo di problema di reperimento di dati.

Il "fattore di correzione" consiste nel rapporto tra le due ETP (Penman/Thornthwaite) a livello di stazione meteorologica:

$$\text{Fattore di correzione} = \frac{\text{ETP(Penman)}}{\text{ETP(Thornthwaite)}}$$

La scala temporale di calcolo è quella mensile.

Tale fattore è stato poi moltiplicato per l'ETP di Thornthwaite a livello di intera regione.

Avendo a disposizione tutti i piani informativi mensili di pioggia ed ETP, è quindi possibile l'elaborazione di una serie di carte dell'Indice di Aridità strutturale per il trentennio di riferimento 1961-1990 e per il successivo decennio 1991-2000 nelle stagioni Primavera ed Estiva:

$$AI = \frac{\sum_1^n P_i}{\sum_1^n ETP_i}$$

In Primavera (Fig. 39a-b), l'estensione delle aree interessate da clima umido, secondo la classificazione illustrata nella legenda, si sono moderatamente ridotte, penetrando climi relativamente più aridi anche in alcuni fondovalle più interni e pedemontani, come il fondovalle della Sieve e il basso Casentino.

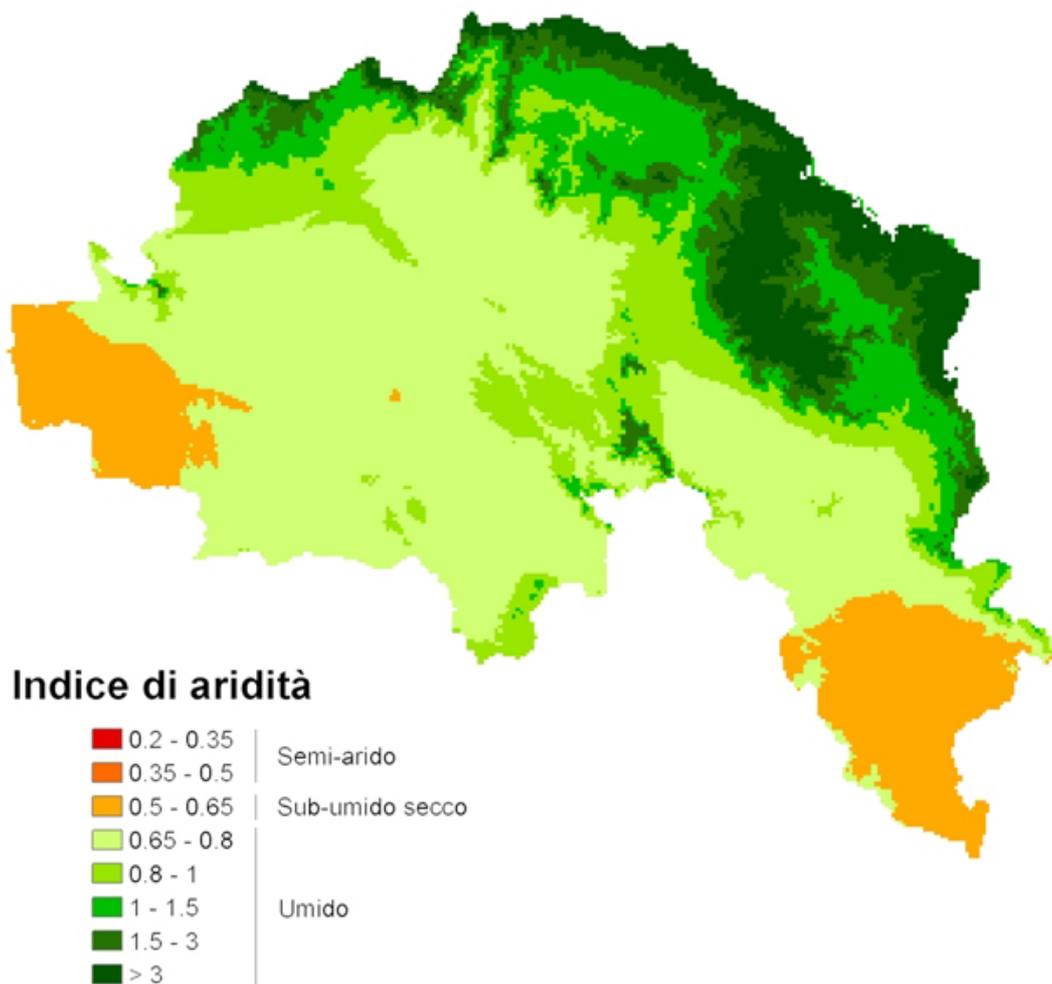
In Estate (Fig. 40c-d), il clima sub-umido secco che già caratterizzava la totalità delle pianure e delle colline centrali e meridionali del Bacino, ha lasciato spazio a un regime decisamente più secco, caratterizzato come "semi-arido", mentre anche i fondovalle pedemontani della Sieve e del Casentino, che in precedenza godevano di un clima umido o semi-umido, vengono ad essere interessati da un clima sempre più secco, che risale sui versanti montani pre-Appenninici. Regimi

¹ Progetto DESERTNET, Interreg IIIB - MEDOCC, Asse 4 Misura 4. WP A10 - Azione pilota in Toscana "Integrazione dei dati climatici, telerilevati e socio-economici per la definizione di indicatori di vulnerabilità alla desertificazione". CNR-IBIMET (Istituto di Biometeorologia), Regione Toscana



climatici umidi persistono ormai soltanto in montagna, approssimativamente oltre gli 800 metri di quota. Da notare anche la comparsa di un regime climatico “arido” nella parte centrale del Bacino, in area di bassa collina, in sponda sinistra dell’Arno.

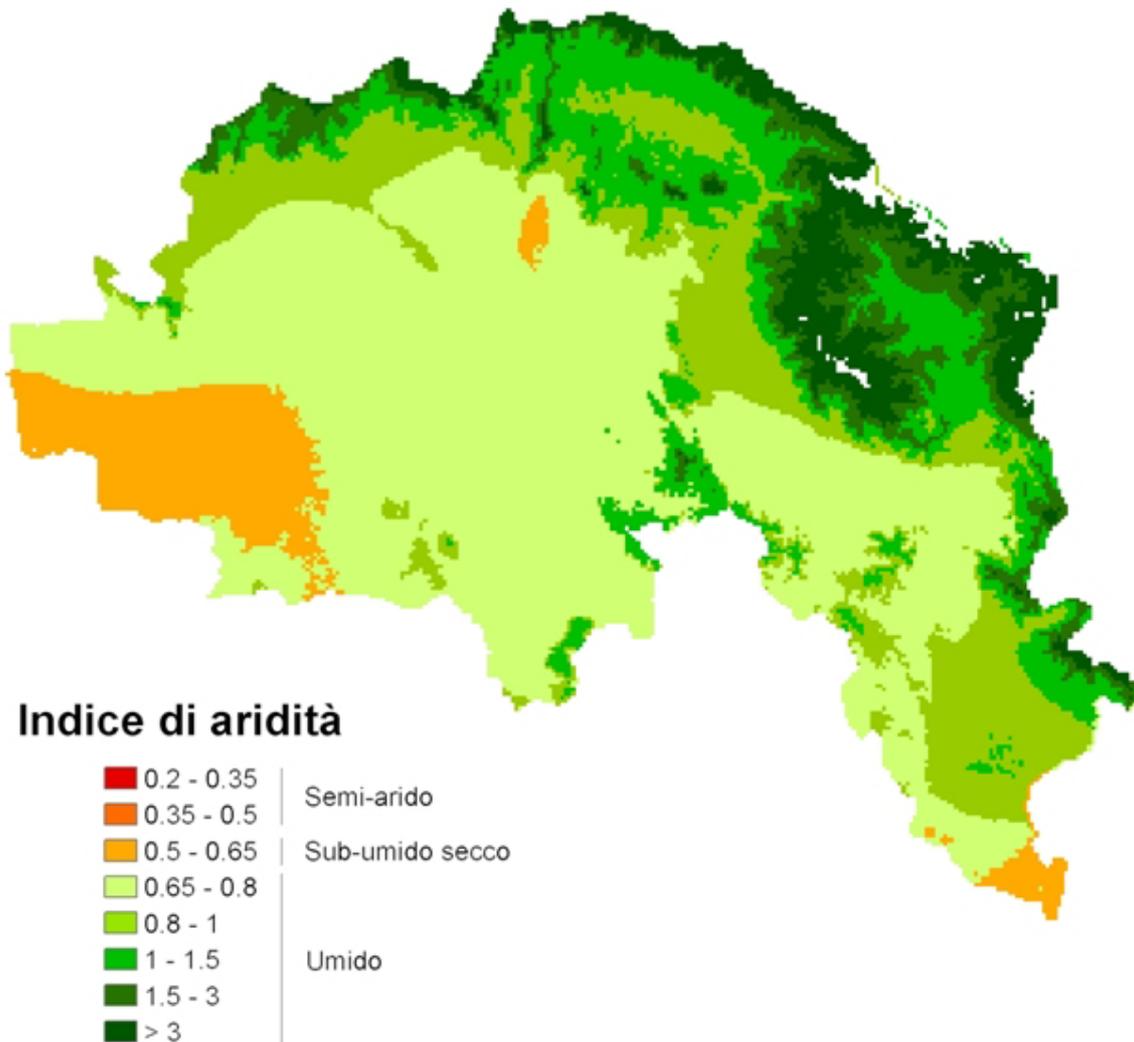
INDICE DI ARIDITA' Primavera (1960-1990)



(a)



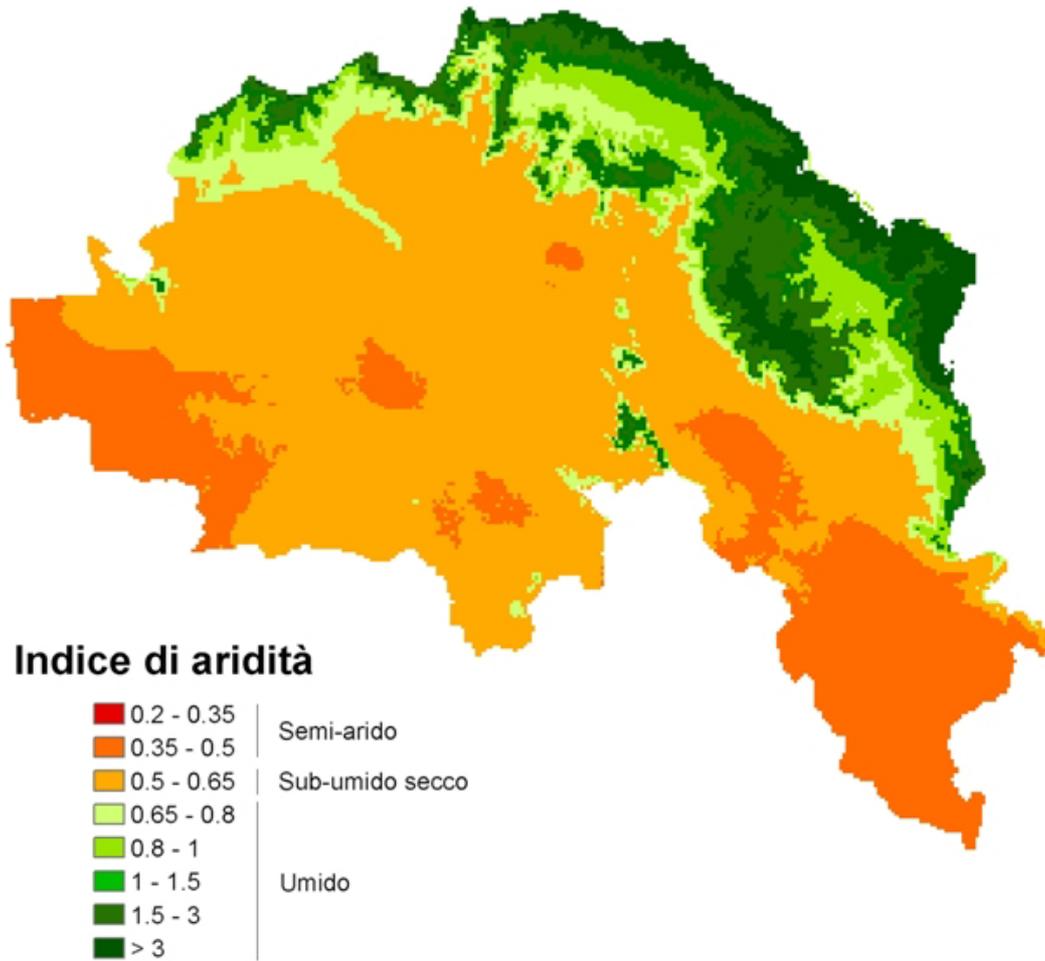
INDICE DI ARIDITA' Primavera (1991-2000)



(b)



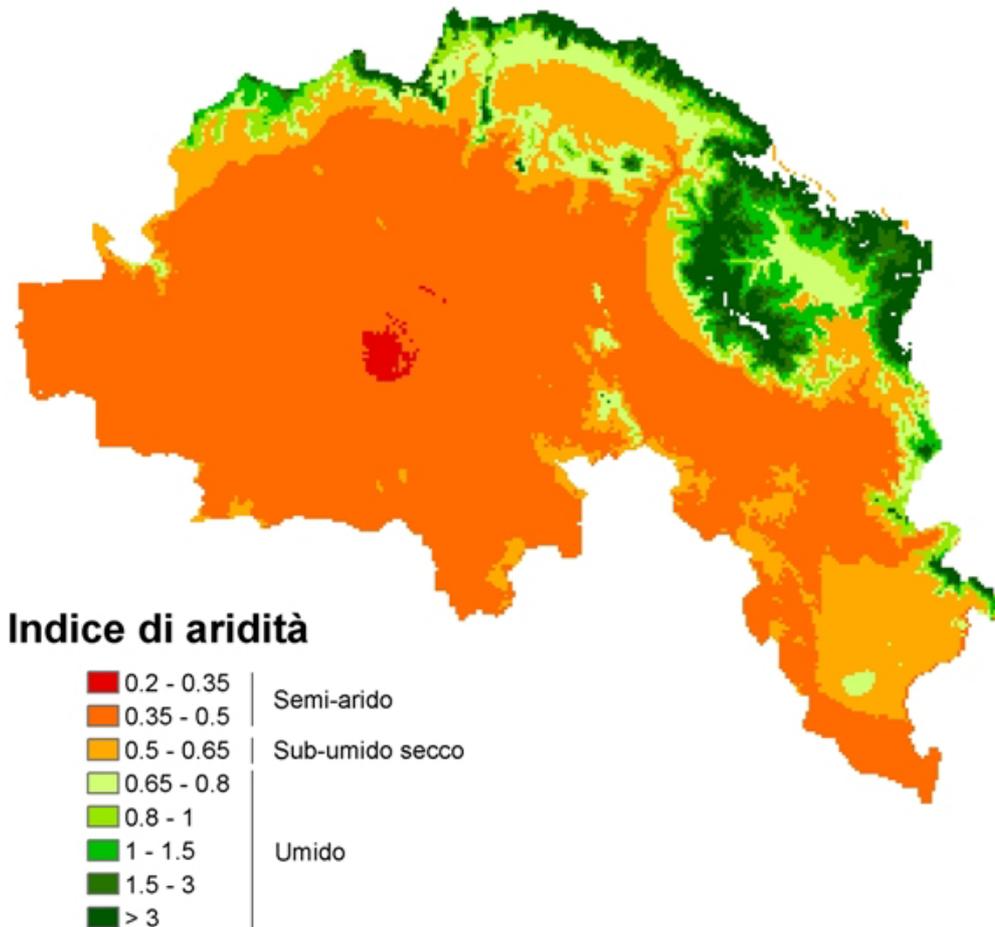
INDICE DI ARIDITA' Estate (1960-1990)



(c)



INDICE DI ARIDITA' Estate (1991-2000)



(d)

Fig. 39 – Mappe dell'indice di Aridità, distribuito sul Bacino dell'Arno, in Primavera (a, b) e in Estate (c, d), in base ai regimi climatici dei periodi 1961-1990 (a, c) e 1991-2000 (b, d)



6.2. Termoudogrammi di Bagnouls

Nei Termoudogrammi di Bagnouls, le temperature medie mensili (medie sul cluster di afferenza) assumono un "peso doppio" rispetto alle precipitazioni mensili (pure mediate sullo specifico cluster); si ha allora, in base a evidenze sperimentali, che quando la curva delle precipitazioni scende sotto quella termica (quando cioè si verifica la condizione $P < 2T$), si assume che si tratti di un periodo di aridità. La superficie compresa tra le due curve indica l'importanza del periodo secco: la durata è espressa dalla differenza tra le due ascisse (asse dei tempi) in cui le curve si intersecano, l'intensità dall'ampiezza della superficie compresa tra le due curve.

I termoudogrammi afferenti alle diverse aree climatiche omogenee del Bacino dell'Arno, identificate in precedenza, sono stati costruiti per il periodo 1961-1990, in cui la base di dati è sufficientemente ampia per costruire curve rappresentative per ogni cluster.

Emerge, dalle Fig. 40(a-n) che nelle aree montane non si ha mai aridità, nel periodo storico di riferimento; nelle maggior parte del territorio del Bacino l'aridità si limita al mese di Luglio, e soltanto in alcune aree marginali meridionali questa si estende al mese di Agosto e occasionalmente anche al mese di Giugno.

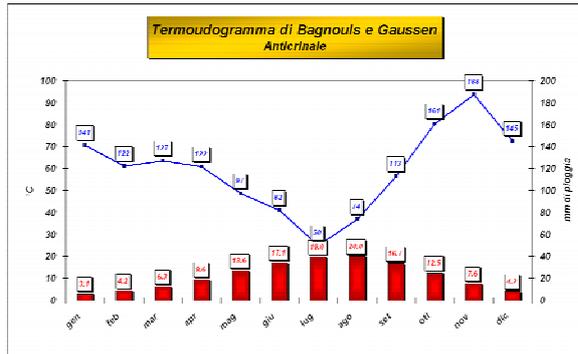
Sono stati quindi costruiti i Termoudogrammi per alcune stazioni rappresentative del Bacino dell'Arno per il passato; le stazioni selezionate, dotate di serie storiche particolarmente omogenee e complete, sono state Firenze Ximeniano, in zona pianeggiante a circa 50 m s.l.m. nella porzione centro-settentrionale del Bacino, e Montepulciano (SI), situata nella parte più meridionale, in prossimità della Val di Chiana, a circa 600 m s.l.m.

Presso Firenze Ximeniano (Fig. 41a, c, e), emerge un aumento dell'intensità e della durata della aridità estiva, in base al confronto del termoudogramma relativo al periodo 1961-1990, in cui il solo mese di Luglio veniva colpito dalla siccità, con quello afferente al periodo 1991-2000, quando questo fenomeno si estendeva al mese di Agosto, con maggiore intensità.

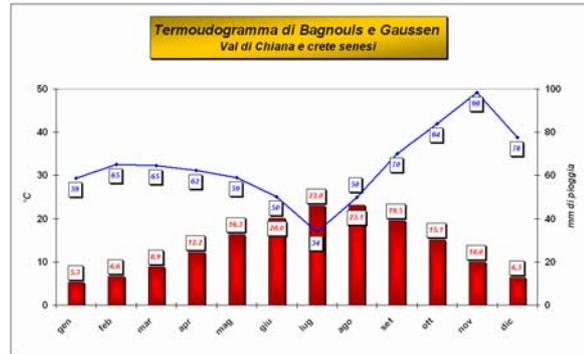
Presso Montepulciano (Fig. 41b, d, f), l'aumento recente delle temperature è stato già superiore a quello osservato presso Firenze Ximeniano e pari a circa 2°C , causando l'estensione del periodo arido dal solo mese di Luglio, in cui era per altro marginale (periodo 1961-1990) al mese di Agosto (periodo 1991-1998), con corrispondente intensificazione nel mese di Luglio.



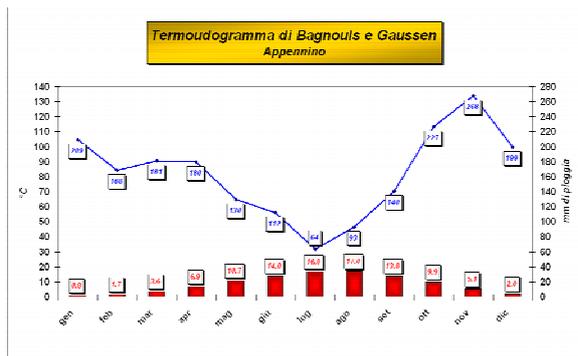
In sintesi, emerge che la forzante fondamentale della siccità estiva è stata la temperatura, più che la precipitazione; poiché questa ha subito gli aumenti più significativi nella parte meridionale del bacino, è in quell'area che lo stesso rischio di siccità è andato aumentando in maggior misura nel tempo.



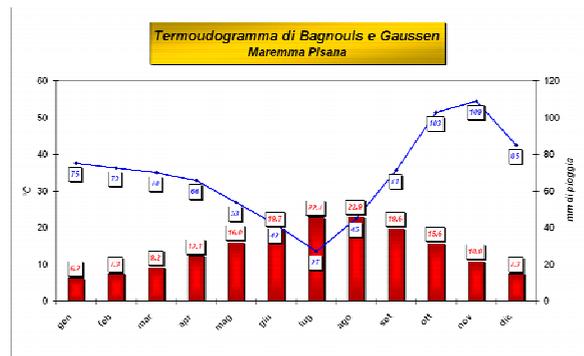
(a)



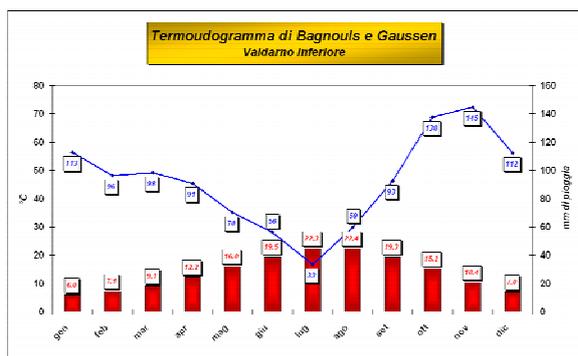
(b)



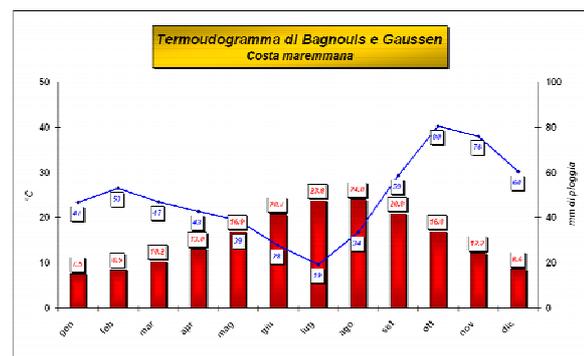
(c)



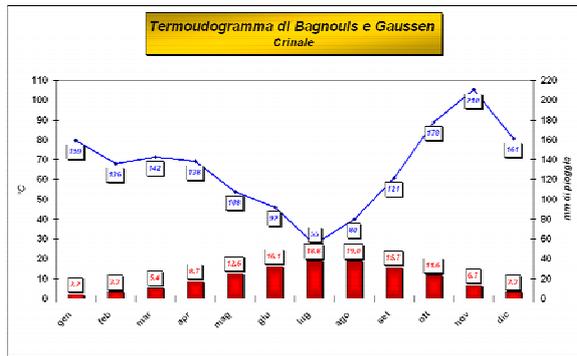
(d)



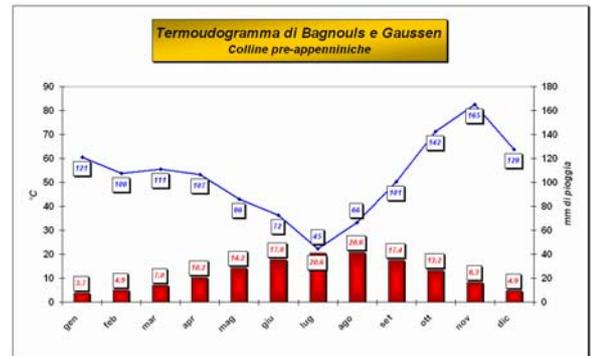
(e)



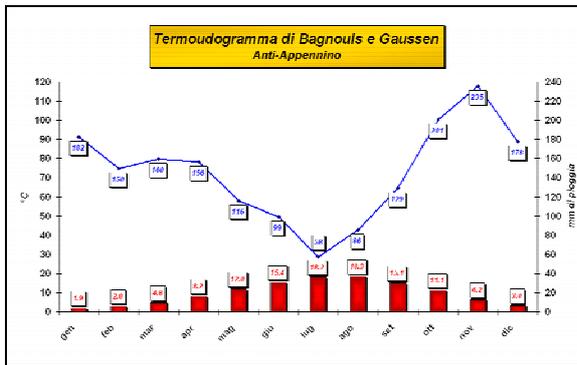
(f)



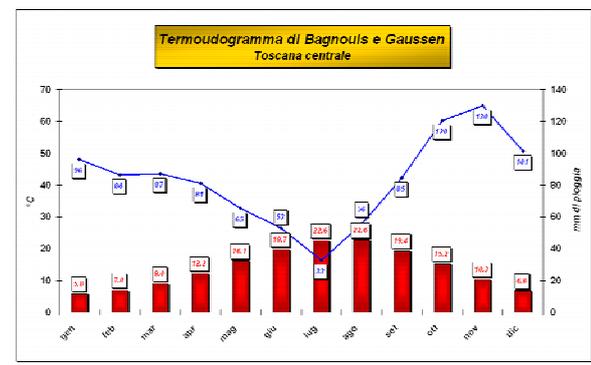
(g)



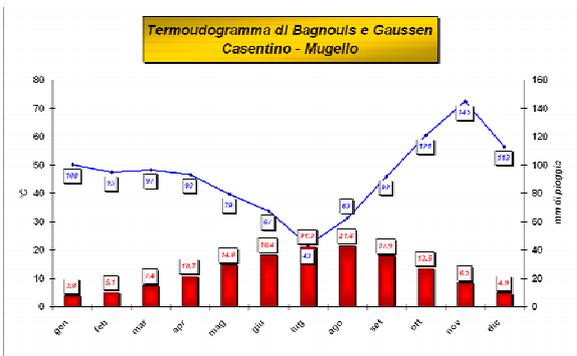
(h)



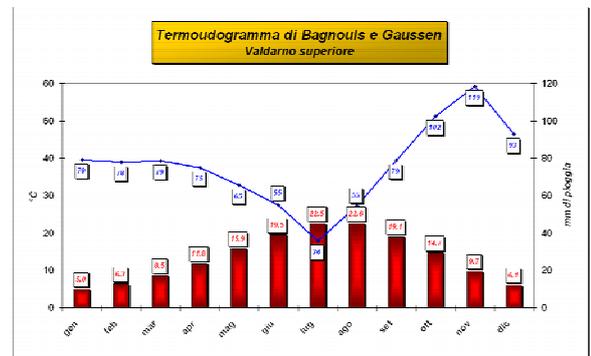
(i)



(l)

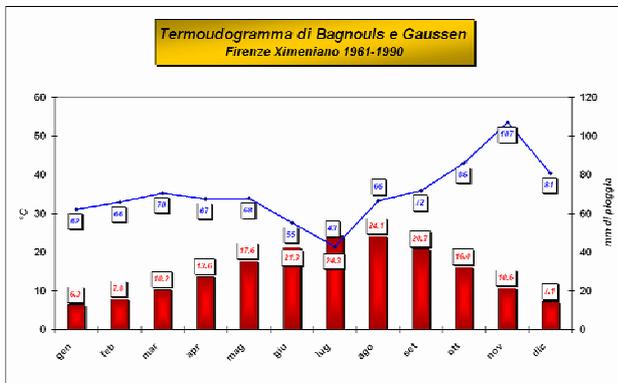


(m)

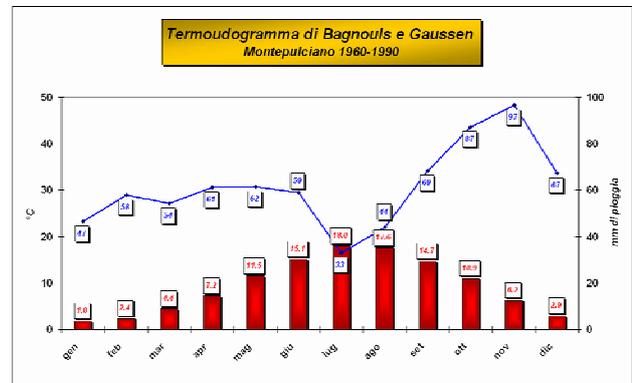


(n)

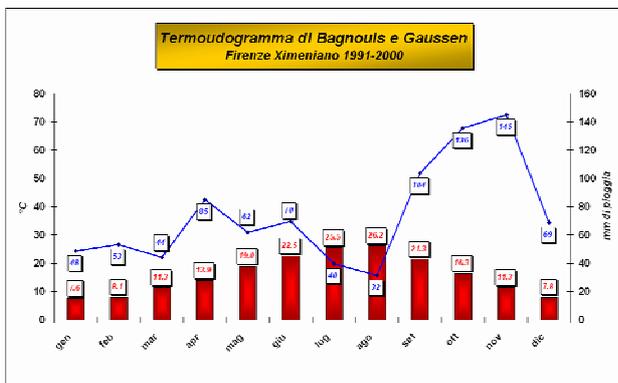
Fig. 40 – Termoudogrammi afferenti alle aree climatiche omogenee del Bacino dell’Arno, nel periodo 1961-1990



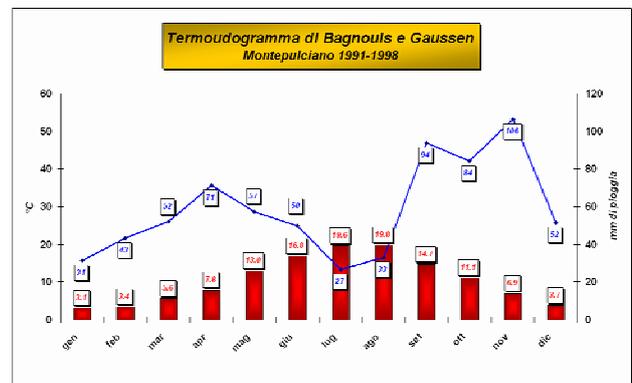
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 41 – Termoudogrammi presso le stazioni di Firenze Ximeniano (a, c, e) e Montepulciano (b, d, f), in base ai regimi climatici dei periodi 1961-1990 (a, b), 1991-2000 (c), 1991-1998 (d)



7. REGIME DELLE PORTATE FLUVIALI

Il regime climatico delle portate fluviali è analizzato in termini delle serie storiche di portate osservate presso due stazioni collocate lungo l'asta principale dell'Arno, e delle relazioni tra le portate e caratteristiche climatiche a scala più grande, quest'ultimo punto sviluppato limitatamente alle portate invernali.

7.1. Serie storiche delle portate

Le serie storiche delle portate medie giornaliere su base annuale del Fiume Arno presso le sezioni di Subbiano, che chiude il sotto-Bacino del Casentino, e San Giovanni alla Vena, prossima alla foce dell'Arno (punti 1 e 3 in Fig. 42), sono riportate in Fig. 43.

Si osserva una diminuzione delle portate di circa il 40% presso le due sezioni, che tuttavia pare avvenire con modalità abbastanza diverse, fin dall'ultimo dopoguerra a San Giovanni alla Vena, soltanto dalla fine degli anni '60 del secolo scorso presso Subbiano. In questa seconda e più recente fase, inoltre, mentre a Subbiano la portata dell'Arno appare mediamente in diminuzione fino ad oggi, presso San Giovanni alla Vena, superata la fase di diminuzione, simultanea a quello occorsa presso Subbiano, non è evidente alcuna tendenza sostenuta alla ulteriore diminuzione.

Il confronto puntuale dei dati raccolti presso Subbiano e San Giovanni alla Vena, illustrato nel diagramma a dispersione di Fig. 44, dimostra che le due serie sono significativamente e fortemente correlate in termini della variabilità inter-annuale, confermando quindi la omogeneità e coerenza delle due serie.

Una spiegazione plausibile del calo delle portate a San Giovanni alla Vena nel secondo dopoguerra può farsi risalire allo sviluppo demografico, industriale e agricolo di gran parte del Bacino dell'Arno, che ha sottratto molta acqua per i rispettivi usi civili, industriali e irrigui; lo stesso non è avvenuto nel Casentino, la cui popolazione complessiva non si è sostanzialmente modificata, e in cui lo sviluppo industriale e agricolo è stato molto limitato.

Per quanto riguarda la differenza delle tendenze osservate negli ultimi 30-40 anni, questa può interpretarsi alla luce della variazione recente dei regimi pluviometrici, in cui le precipitazioni sono



significativamente diminuite sulla parte più interna del Bacino dell'Arno, a fronte di una stazionarietà o perfino di un contenuto aumento sulla parte media e costiera.

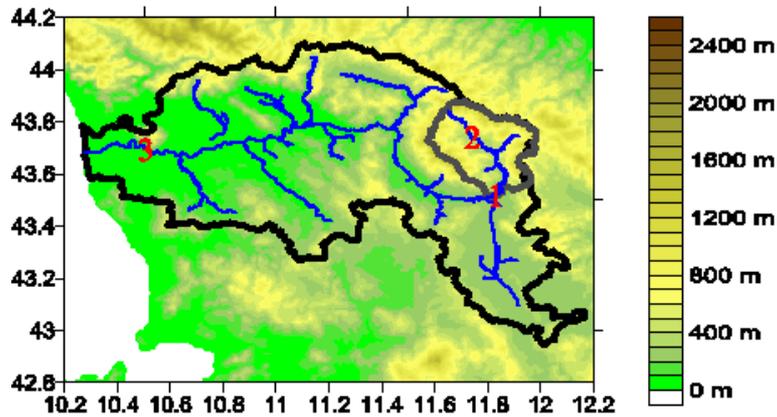


Fig. 42 – Localizzazione delle stazioni idrometriche considerate: 1=Subbiano, 2=Stia (non considerata), 3=San Giovanni alla Vena

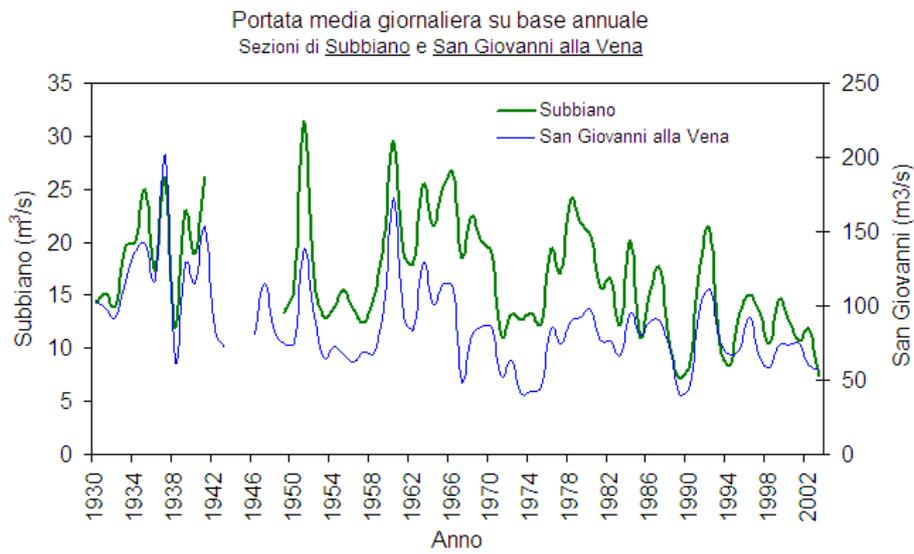


Fig. 43 – Serie storiche delle portate medie giornaliere su base annuale presso le sezioni di Subbiano e San Giovanni alla Vena

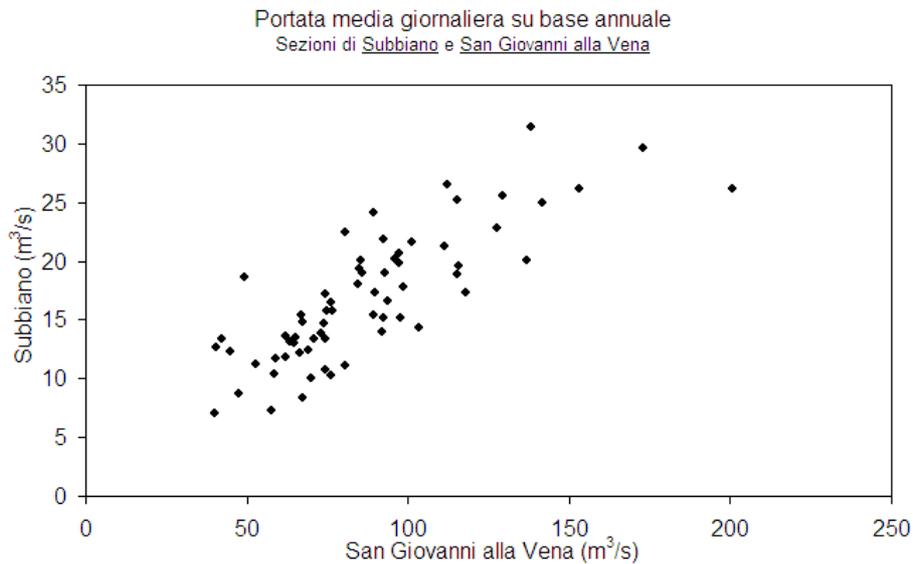
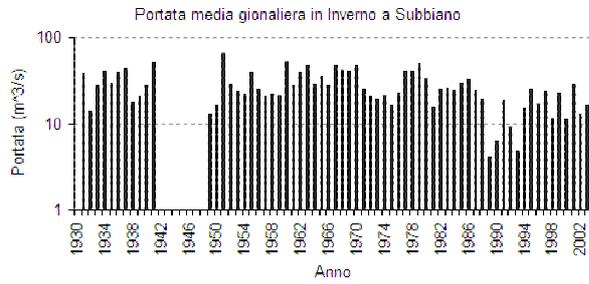


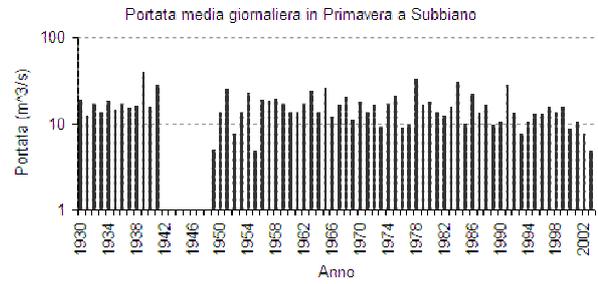
Fig. 44 – Confronto diretto delle portate medie giornaliere su base annuale presso le sezioni di Subbiano e San Giovanni alla Vena

Le Fig. 45(a-d) illustrano le trasformazioni della portata dell'Arno presso la sezione di Subbiano nelle diverse stagioni, in scala semi-logaritmica.

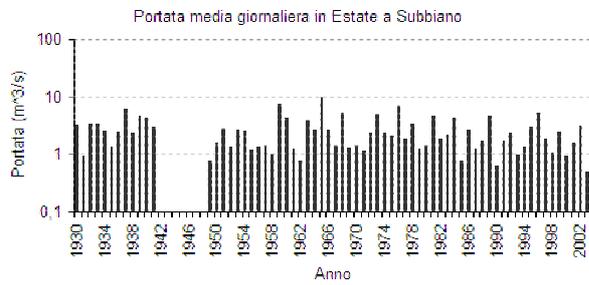
Una diminuzione delle portate è evidente in tutte le stagioni, più marcata nel periodo Invernale, quando la portata risponde quasi esclusivamente alla precipitazione. Nelle altre stagioni, invece, la sola evoluzione del regime pluviometrico è incapace di spiegare completamente la diminuzione delle portate, e in questo caso il regime termico assume un ruolo significativo rispetto alla riduzione della portata fluviale, in particolare in Primavera.



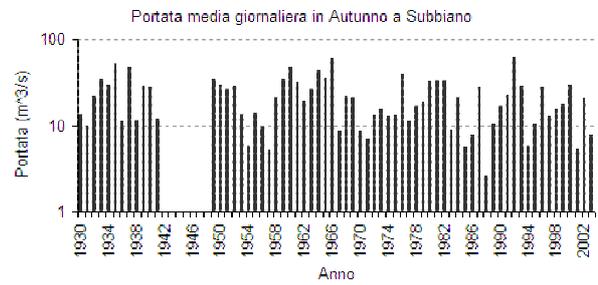
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 45 – Confronto diretto delle portate medie giornaliere su base annuale presso le sezioni di Subbiano e San Giovanni alla Vena