

LIVIO BIANCHI (\*) - GIANFRANCO CALAMINI (\*)  
ENRICO GREGORI (\*\*\*) - GIOVANNI ZORN (\*\*\*)

## VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL RIMBOSCHIMENTO IN ZONE ARIDE DELLA SARDEGNA (1) INQUADRAMENTO CLIMATICO DELLE AREE SPERIMENTALI

FDC 111.82 : 233 : (450.88)

*Viene esposta l'analisi climatica dettagliata eseguita sui dati di 17 stazioni meteorologiche della Sardegna; da tale informazione sono state estrapolate le condizioni climatiche di tre località oggetto di indagini sull'efficacia dei rimboschimenti nel controllo del processo di desertificazione. In base all'annata media, tutte le stazioni ricadono nel bioclima mediterraneo pluviostagionale oceanico di Rivas-Martinez, con un rapporto fra precipitazioni ed evapotraspirazione potenziale quasi sempre superiore alla soglia di subumidità. L'analisi della serie storica dei dati evidenzia una tendenza all'aumento della temperatura media annua di quasi mezzo grado per decennio a partire dai primi anni Sessanta ed una parallela diminuzione del totale annuo di precipitazione pari a circa 8 mm l'anno. Tutti gli indici utilizzati per saggiare l'esistenza di stress idrici forniscono informazioni sostanzialmente concordi e separano abbastanza nettamente le stazioni montane dalle due prossime al mare. Nel periodo considerato gli indici climatici manifestano una marcata oscillazione interannuale, evidenziando la ricorrenza di annate particolarmente critiche per la vegetazione. Sono stati infine costruiti dei modelli di regressione della temperatura e della piovosità mensili rispetto all'altitudine, attraverso i quali è stato possibile inquadrare climaticamente e con buona approssimazione le tre località di indagine. Sulla base di questa valutazione il loro clima risulta abbastanza omogeneo e riferibile alla fascia fitoclimatica di Pavari del Castanetum caldo con siccità estiva e, tenuto conto anche delle caratteristiche edafiche, alle tipologie umide del sistema climatico di Thornthwaite.*

### INTRODUZIONE

Il fattore clima è riconosciuto come uno dei principali elementi predisponenti, ancorché non esclusivo, di quei processi di declino delle potenzialità del territorio che vengono attualmente definite con il termine di

---

(\*) Università degli Studi di Firenze, DISTAF.

(\*\*) Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo, Firenze.

(1) Lavoro svolto nell'ambito del progetto MIUR cofin2000 «Studio dell'influenza e del ruolo di frangivento, alberature e rimboschimenti nella lotta alla desertificazione in ambiente mediterraneo».

«desertificazione» (ENNE e ZUCCA, 2000). In questo contesto gli aspetti climatici assumono una importanza sempre crescente alla luce degli ormai incontestabili mutamenti climatici a scala planetaria, che potrebbero compromettere la capacità degli ecosistemi di conservare il loro equilibrio dinamico (KOSMAS *et al.*, 1999).

Ai fini della desertificazione gli elementi di maggior rilievo sono costituiti per lo più dall'entità, stagionalità e variabilità interannuale degli afflussi idrici; un'altra caratteristica importante è rappresentata dalla ricorrenza di eventi piovosi particolarmente intensi in grado di causare perdite cospicue di terreno per erosione idrica. Sicuramente meno preoccupante dal punto di vista della diffusione e dell'intensità appare invece, per la realtà italiana, il fenomeno dell'erosione eolica.

Una gestione delle risorse naturali mirata al mantenimento dell'integrità fisica del suolo e della sua fertilità costituisce una premessa indispensabile alla salvaguardia della resilienza delle cenosi vegetali ed animali. Queste comunità si trovano esposte, specialmente nelle aree mediterranee, a continue variazioni di fattori sia ambientali naturali che antropici, e sono in grado di reagire rapidamente a tali cambiamenti purché non siano state eccessivamente alterate. Il suolo rappresenta l'elemento dominante, specialmente in ambienti semi-aridi e sub-umidi, per il mantenimento della copertura vegetale, che a sua volta protegge il terreno dall'erosione e dalla perdita di elementi nutritivi; ma tale protezione può manifestarsi solamente quando sia disponibile per gli apparati radicali un volume di suolo sufficiente per sostenere un livello di copertura adeguato.

Circa i rapporti fra clima e suolo è opportuno sottolineare l'esistenza di un equilibrio dinamico che viene generalmente mantenuto attraverso processi abbastanza diluiti nel tempo: il suolo raggiunge in questo modo stadi evolutivi più o meno avanzati in funzione degli altri fattori della pedogenesi. L'azione dell'uomo, per esempio attraverso il pascolo, l'incendio, le lavorazioni del terreno, etc., è in grado invece di scatenare reazioni del sistema anche violente, con risultati in genere tanto più devastanti quanto più fragile è la situazione di partenza e/o più incostante l'andamento climatico.

In una recente pubblicazione (BIANCHI *et al.*, 2002) si è riferito sull'impostazione e su alcuni risultati preliminari della ricerca relativa agli effetti dei rimboschimenti di conifere rispetto alla vegetazione spontanea (macchia) di ambienti mediterranei suscettibili ai processi di desertificazione. Il presente contributo intende approfondire l'ambito climatico delle aree in cui sono state condotte le ricerche, analizzandone gli aspetti che condizionano la funzionalità della copertura vegetale.

## MATERIALI E METODI

Per l'inquadramento climatico delle tre località di indagine<sup>2</sup>, non essendo disponibili dati meteorologici puntuali, si è fatto ricorso a quelli delle stazioni del Servizio Idrografico della Regione Autonoma della Sardegna, scegliendo quelle relativamente vicine e/o analoghe per contesto geografico e morfologia e con almeno un trentennio di osservazioni (Tab. 1). I dati sono stati estrapolati mediante ponderazione in funzione della distanza e della differenza di quota e verificando l'esistenza di relazioni fra variabili climatiche ed altitudine con metodi di regressione lineare.

Tabella 1 – Localizzazione e periodo di osservazione dei dati meteorologici nelle stazioni esaminate (con \* le località delle aree sperimentali).

– *Location and observation period of meteorological data for sampled stations (\*experimental sites).*

Stazione	Altitudine (m s.l.m.)	Latitudine Nord	Long. Ovest (M. Mario)	Periodo di osservazione	
				temperatura	precipitazioni
Is Cannoneris	716	39° 01'	3° 36'	1973 - 2001	1925 - 2001
Ales	167	39° 46'	3° 38'	1970 - 2001	1921 - 2001
Fonni	992	40° 7'	3° 12'	1957 - 2001	1921 - 2001
Zuighe	520	40° 45'	3° 5'	1973 - 2001	1921 - 2001
Budoni	20	40° 42'	2° 47'	1967 - 2001	1958 - 2001
Ala dei Sardi	663	40° 39'	3° 7'	1951 - 2001	1921 - 2001
Genna Silana	1010	40° 9'	2° 56'	1960 - 2001	1921 - 2001
Montevecchio	370	39° 33'	3° 52'	/	1921 - 2001
Villaverde	204	39° 47'	3° 38'	/	1921 - 2001
Marrubiu	32	39° 46'	3° 48'	/	1922 - 2001
Uras	20	39° 42'	3° 45'	/	1949 - 2001
Mogorella	299	39° 52'	3° 36'	/	1922 - 2001
Montes	1060	40° 9'	3° 3'	/	1949 - 2001
Orgosolo	591	40° 12'	3° 6'	/	1921 - 2001
Mamoiada	644	40° 12'	3° 10'	/	1921 - 2001
Mazzinaiu	617	40° 42'	3° 4'	/	1921 - 2001
Torpè	24	40° 37'	2° 46'	/	1921 - 2001
Monte Arci *	730	39° 47'	3° 42'	/	/
Montes *	1100	40° 7'	3° 5'	/	/
Usinavà *	555	40°41'	2° 52'	/	/

Il *database* climatico utilizzato per la presente analisi è costituito dai valori di temperatura massima, minima e media mensili e di precipitazione mensile (periodo riferito in Tab. 1) e giornaliera (periodo 1951-2001).

I dati termo-pluviometrici di cui sopra sono serviti per elaborare il diagramma ombrotermico di Bagnouls e Gaussen, per le classificazioni cli-

<sup>2</sup> Monte Arci, comune di Ales (OR); Montes, comune di Orgosolo (NU); Usinavà, comune di Torpè (NU).

matiche di Köppen (PINNA, 1977), di Pavari (MARCHETTI *et al.*, 1987), di Thornthwaite (PINNA, 1977), previo calcolo del bilancio idrico per suoli con 100 mm di acqua disponibile per le piante (AWC), nonché per l'inquadramento bioclimatico proposto da RIVAS-MARTINEZ e collaboratori (2001), basato su una serie di indici (di continentalità, ombrotermico annuale e del bimestre estivo, di termicità).

Sono stati ancora calcolati l'indice di concentrazione stagionale delle piogge (rapporto fra il totale di ogni trimestre ed un quarto del totale medio annuo), l'indice di Fournier modificato da ARNOLDUS (1977), noto come indice  $F_{FAO}$ , che esprime il grado di concentrazione mensile delle piogge, l'indice di De Martonne, l'indice di De Martonne e Gottman, il quoziente pluviometrico di Emberger, il pluviofattore di Lang e l'indice di continentalità idrica di Gams, tutti secondo BLASI (1998). L'indice *Monthly Cold Stress* (MCS) di MITRAKOS (1982) è stato inoltre adottato per valutare l'entità degli stress da freddo sulla vegetazione di tipo mediterraneo.

La valutazione delle condizioni di deficit idrico rappresenta un aspetto complesso, trattandosi di stimare il rapporto fra evapotraspirazione reale e quella potenziale, quantificabili in maniera adeguata solo con misure dirette o con modelli deterministici basati su molte variabili meteorologiche. Oltre agli indici generali di aridità climatica prima menzionati, le condizioni di stress idrico sono state valutate ricorrendo all'indice *Monthly Drought Stress* (MDS) di MITRAKOS (1982), al rapporto  $P/ETP$  fra precipitazione annua ed evapotraspirazione potenziale (FAO-UNESCO, 1977), all'indice di aridità di Bagnouls e Gaussen (BGI) riportato in KOSMAS *et al.* (1999) ed all'indice di stress idrico costituito dal complemento a 1 della evapotraspirazione relativa di AMORIELLO e COSTANTINI (1999) che rappresenta la proporzione massima possibile del deficit idrico rispetto all'ETP in assenza di capacità del suolo di immagazzinare acqua utile per la vegetazione. Per valutare la dinamica dello stato di umidità del suolo è stata inoltre adottata la procedura del *Curve Number* del SOIL CONSERVATION SERVICE (1972), che attribuisce ogni giornata alla classe di *Antecedent Moisture Condition* (AMC) sulla base dell'afflusso nei 5 giorni precedenti, definendo condizioni di suolo asciutto (AMC I), umido (AMC II) o bagnato (AMC III) secondo soglie variabili con la stagione vegetativa (BORSELLI, 1989).

Il metodo di KOSMAS *et al.* (1999) è stato infine applicato per la classificazione della qualità del clima rispetto alla desertificazione, a partire da piovosità, aridità (BGI definito in precedenza) ed esposizione.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

La temperatura media annua nelle 7 stazioni esaminate per il periodo indicato in Tab. 1 varia da 11.6 di Genna Silana a 16.6°C di Budoni (Tab. 2); il mese più caldo, definito in base alla temperatura media più elevata, è di solito luglio per Is Cannoneris, Ales e Genna Silana ed agosto per le altre località, con una temperatura media che oscilla dai 21.3 di Genna Silana ai 25.2°C di Ales ed una media delle massime compresa fra 27.2 e 33.3°C rispettivamente nelle due stazioni citate. Gennaio è solitamente il mese più freddo, con una temperatura media di 3.1 ÷ 7.5°C ed una media delle minime variabile dai 1.3 ai 6.9°C. Le oscillazioni interannuali delle temperature medie sono sensibili ed appaiono abbastanza in sincronia nelle

Tabella 2 – Caratteristiche dell'annata meteorologica media (1951 - 2001) per le 7 stazioni termo-udometriche.

– Features of the average weather year (1951 – 2001) for the 7 thermopluviometric stations.

	<i>Is Cannoneris</i>	<i>Ales</i>	<i>Fonni</i>	<i>Zuighe</i>	<i>Budoni</i>	<i>Alà dei Sardi</i>	<i>Genna Silana</i>	
Temperatura media annua (°C)	13,9	15,8	12,9	13,1	16,6	13,3	11,6	
T. m. mese + caldo (°C) *	23,4	25,2	22,7	22,2	24,6	22,7	21,3	
T. m. max mese + caldo (°C) *	29,5	33,3	28,9	29,7	29,8	31,1	27,2	
T. m. mese + freddo (°C) **	6,0	7,5	4,2	5,0	9,7	5,0	3,1	
T. m. min mese + fr. (°C) **	4,1	3,5	2,3	2,2	6,9	1,6	1,3	
Precipitazione annua (mm)	996	708	947	843	567	933	1019	
N° annuo di giorni piovosi	N.D.	74	91	73	64	86	79	
F-FAO	109	75	101	89	61	101	109	
Classif. climatica di Köppen	<i>C sa</i>	<i>C sa</i>	<i>C sa</i>	<i>C sa</i>	<i>C sa</i>	<i>C sa</i>	<i>C sb</i>	
Classif. di Thornthwaite								
AWC	B1s2 B2'	C1s2 B2'	B1s2 B2'	C2s2 B2'	C1s B2'	B1s2 B2'	B2s B1'	
100 mm	b4'	b4'	b4'	b4'	b4'	b4'	b4'	
Fascia fitoclimatica di Pavari #	<i>Castanetum caldo b</i>	<i>Lauretum freddo</i>	<i>Castan. caldo b</i>	<i>Castan. caldo b</i>	<i>Lauretum medio</i>	<i>Castan. caldo b</i>	<i>Castan. freddo a</i>	
Pluviofattore di Lang	72	45	74	65	34	70	88	
Indice di continentalità di Gams	41	13	60	35	2	41	57	
Indice di De Martonne	42	27	41	37	21	40	47	
Indice di De Martonne-Gottman	22	15	24	20	11	22	25	
Quoziente pluviom. di Emberger	116	64	113	96	67	96	138	
ETP di Thornthwaite (mm)	753	836	724	737	846	736	681	
Classificazione bioclimatica di Rivas-Martinez								
			macrobioclima mediterraneo					
bioclina	Mepo	Mepo	Mepo	Mepo	Mepo	Mepo	Mepo	
termotipo	Mme	Mme	Mme	Mme	Tme	Mme	Sme	
ombrotipo	Hum	Shu	Shu	Hum	Dry	Hum	Hum	

\*: mese + caldo di ciascuna annata del periodo;

\*\* : mese + freddo di ciascuna annata del periodo;

#: sottozona a = senza siccità estiva; sottozona b = con siccità estiva.

diverse stazioni (Fig. 1). Da notare come il valore medio quinquennale delle 6 stazioni<sup>3</sup> sia andato progressivamente aumentando, passando da 13.0 a 15.1°C: la regressione lineare di questi valori presenta un coefficiente angolare pari a 0.05, che indica la tendenza della temperatura ad aumentare di mezzo grado per decennio ( $r = 0.89$ ;  $P < 0.01$ ). Eliminando i dati di Ales, apparentemente non omogenei con i restanti, si ottiene una linea di tendenza con aumento medio su base decennale di poco inferiore a 0.4°C.

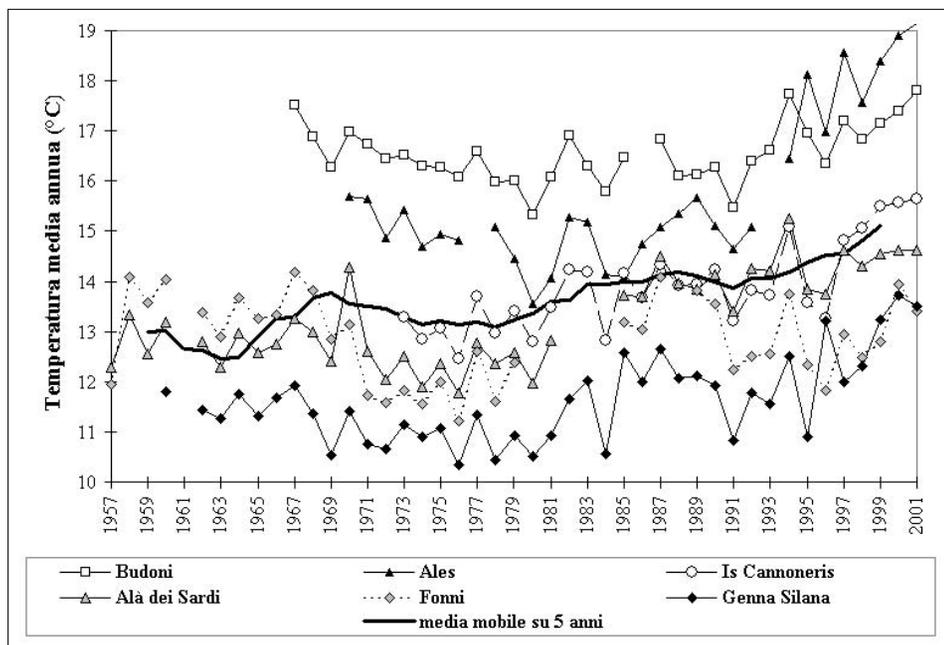


Figura 1 – Variazione interannuale della temperatura media annua nelle stazioni analizzate e media mobile quinquennale.

– Variation of average yearly temperature in the studied stations and floating mean over a 5 year period.

La temperatura media annua delle 7 stazioni esaminate è inversamente correlata con l'altitudine ( $r = -0.98$ ,  $P < 0.01$ ), con un gradiente medio pari a  $-0.4$  °C per ogni 100 m di dislivello. Anche le temperature medie mensili mantengono queste relazioni, con gradienti compresi fra  $-0.28$  di luglio e  $-0.54$  °C di febbraio; i coefficienti di correlazione lineare si mantengono sempre elevati, con livelli di significatività comunque inferiori al 5%. Gradienti mensili leggermente superiori e pur sempre significativi si possono

<sup>3</sup> La stazione di Zuighe è stata omessa per il ridotto numero di annate e per la presenza di annate con valori «anomali».

ricavare anche dai dati di ARANGINO *et al.* (1986) per 18 stazioni sarde (1924-1975): la non perfetta corrispondenza dei risultati è da attribuirsi alla diversa distribuzione altitudinale delle stazioni e allo sfasamento del periodo di osservazione. Considerato che la temperatura media mensile non è risultata correlata con le altre variabili geografiche (latitudine e longitudine), i gradienti altimetrici sono stati utilizzati per la stima delle temperature medie mensili. Allo scopo, tali gradienti sono stati applicati ai dati termici di quella delle 7 stazioni con condizioni più «simili» a quelle di ciascuna area di studio e, per confronto, anche ai dati di tutte le stazioni limitrofe; gli stessi dati di partenza sono stati elaborati con i gradienti termici calcolati dalle due stazioni più vicine e con quelli derivati dai dati di ARANGINO *et al.* (1986). I risultati così ottenuti mostrano variazioni molto contenute e sono esemplificati in Tab. 3.

La precipitazione media annua nelle stazioni considerate varia tra 570 mm di Budoni ed Uras e 1070 mm di Montes (Tabb. 2 e 4), con massimo assoluto nel mese di dicembre e minimo sempre a luglio; molte stazioni presentano un picco secondario a febbraio o marzo (Fig. 2). Le precipitazioni si distribuiscono in maniera molto disforme nell'annata media: l'indice di concentrazione stagionale delle piogge è infatti compreso tra 0.14 e 1.62. Per la stagione estiva, in particolare, si è calcolato un indice medio pari a 0.22, con estremi che vanno da 0.14 di Marrubiu a 0.31 di Fonni, a cui corrispondono rispettivamente 23 e 61 mm di pioggia.

La variabilità interannuale delle precipitazioni è molto accentuata (Fig. 3), con un coefficiente di variazione medio pari al 29%. La media generale e quella mobile undecennale della stessa figura si riferiscono a tutte le 17 stazioni e indicano l'esistenza di oscillazioni cicliche, ma anche di una netta tendenza, a partire dalla seconda metà degli anni Sessanta, ad una generale riduzione degli afflussi annui. La retta di regressione che interpola i valori annuali a partire dal 1966 presenta un coefficiente angolare pari a circa -8, che sta ad indicare una diminuzione media di 80 mm di pioggia per decennio.

La precipitazione media risulta direttamente correlata con l'altitudine, sia su base annua ( $r = 0.79$ ,  $P < 0.01$ ) che mensile ( $r = 0.60$  a ottobre e  $r = 0.84$  a maggio;  $P < 0.01$ ). Il gradiente pluviometrico annuo vale 40 mm per ogni 100 m di dislivello, contro un valore di 41 mm ottenuto dai dati di ARANGINO *et al.* (1986); il gradiente mensile è compreso fra 0.7 di luglio e 7.1 mm/100 m di dicembre. Analogamente alla procedura applicata per la temperatura i gradienti altimetrici sono serviti per la stima delle piogge medie mensili delle aree di indagine; i risultati ottenuti considerando i gradienti dei diversi gruppi di stazioni sono molto omogenei (Tab. 3), discostandosi di meno di 15 mm all'anno per località e totalizzando 1000 mm di pioggia a Monte Arci e Usinavà e 1100 circa a Montes.

Tabella 3 – Confronto fra valori medi mensili di temperatura e piovosità delle 3 aree di indagine stimati secondo approcci diversi.  
 – Comparison among monthly average temperature and rain values of the 3 experimental sites according to different estimation methods.

Località	gradiente delle stazioni	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
Monte Arci	2 più vicine	6,7	6,9	8,5	10,2	15,2	19,4	23,3	23,3	19,3	15,0	10,5	7,8	13,9
	7 analizzate	6,7	6,9	8,5	10,2	15,2	19,4	23,3	23,3	19,3	15,0	10,5	7,8	13,8
	18 Sardegna*	6,7	6,9	8,5	10,2	15,2	19,4	23,3	23,2	19,2	15,0	10,5	7,8	13,8
Montes	2 più vicine	4,8	5,3	7,3	9,1	14,7	18,3	22,2	22,4	17,6	13,5	8,4	5,6	12,4
	7 analizzate	4,6	5,1	7,1	9,1	14,6	18,4	22,2	22,4	17,9	13,5	8,5	5,5	12,4
	18 Sardegna*	4,4	4,9	7,0	9,0	14,4	18,4	22,2	22,4	17,8	13,3	8,3	5,2	12,3
Usinavà	2 più vicine	6,4	7,1	8,9	11,0	15,4	19,5	22,8	23,0	19,3	15,2	10,4	7,4	13,9
	7 analizzate	6,2	7,0	8,8	10,9	15,3	19,5	22,7	23,0	19,2	15,0	10,2	7,2	13,8
	18 Sardegna*	6,4	7,2	9,0	11,0	15,4	19,5	22,8	23,1	19,3	15,2	10,4	7,5	13,9
Monte Arci	5 più vicine	126	114	103	93	57	28	11	16	43	114	132	159	996
	17 analizzate	127	116	98	93	63	25	11	18	50	104	133	164	1002
	18 Sardegna*	126	120	99	101	69	32	13	21	53	90	135	153	1009
Montes	5 più vicine	131	125	104	94	70	26	14	27	58	124	154	178	1106
	17 analizzate	130	124	103	93	69	26	14	27	57	121	151	175	1090
	18 Sardegna*	129	124	103	93	70	27	14	27	58	120	151	174	1090
Usinavà	5 più vicine	115	107	106	92	61	28	9	21	50	107	138	170	1004
	17 analizzate	114	106	105	91	60	28	9	21	50	108	137	169	997
	18 Sardegna*	114	106	105	91	61	28	9	21	50	107	137	169	998

\* dati in ARANGINO *et al.* (1986).

Tabella 4 – Caratteristiche dell'annata meteorologica media (1921 - 2001) per le 10 stazioni pluviometriche.  
 – Features of the average weather year (1921 – 2001) for the 10 pluviometric stations.

Stazione	Piovosità (mm)	F-FAO	Indice di Gams	MDS anno medio		MDS media annua del periodo			
				somma indici mensili	periodo (MDS >=5)	somma indici mensili	N° mesi con MDS >=5	somma mesi estivi	estate (% su tot annuo)
Montevecchio	716	82	30	282	mag-set	412	6	249	62%
Villaverde	867	97	13	235	giu-set	361	5	233	68%
Marrubiu	648	73	3	288	mag-set	444	7	257	60%
Uras	569	65	2	307	mag-set	483	7	260	55%
Mogorella	729	79	23	243	mag-set	398	6	238	61%
Montes	1074	117	57	170	giu-ago	300	5	198	69%
Orgosolo	661	72	51	265	mag-set	423	7	233	56%
Mamoiada	768	83	48	224	giu-set	388	6	216	59%
Mazzinaiu	1015	110	35	174	giu-ago	322	5	202	63%
Torpè	699	78	2	267	mag-set	470	7	237	52%

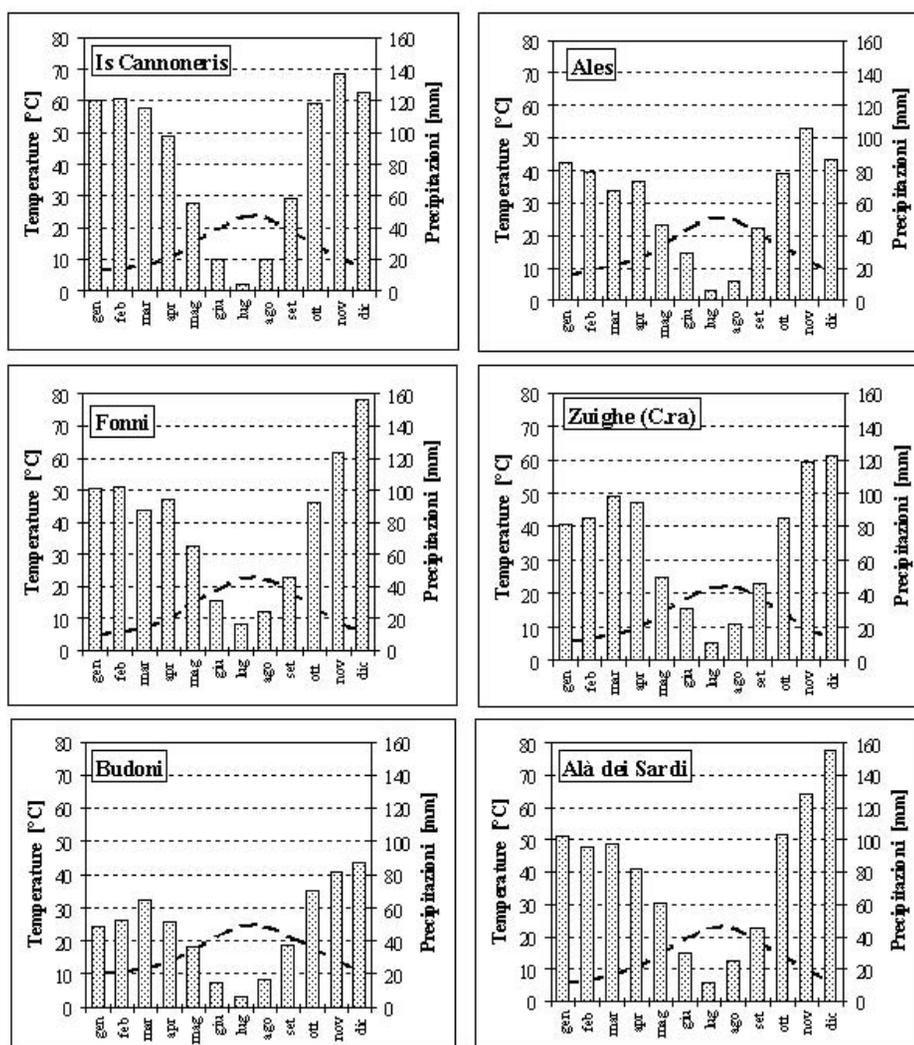


Figura 2 – Diagrammi umbro-termici secondo Bagnouls e Gausson per 6 stazioni termo-pluviometriche.  
– Bagnouls and Gausson diagrams of weather data for 6 thermopluviometric stations.

Per l'annata media il numero dei giorni piovosi varia da 64 di Budoni a 91 di Fonni, senza una netta relazione con il totale medio annuo di precipitazioni. Nel periodo 1957 – 2001 la media undecennale presenta un andamento sinusoidale con modeste variazioni, con massimo agli inizi degli anni Ottanta.

L'indice  $F_{FAO}$  per l'anno medio evidenzia una discreta concentrazione mensile delle piogge in 6 stazioni su 17, indicando un'aggressività climatica intermedia nei confronti dell'erosione idrica del suolo (Tabb. 2 e 4). Analo-

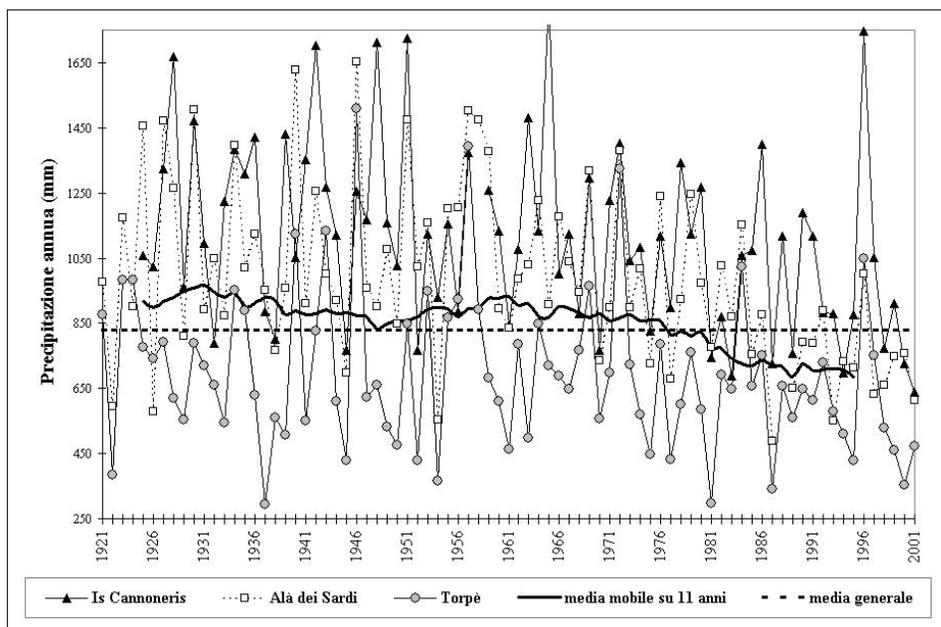


Figura 3 – Escursione annuale delle precipitazioni in alcune stazioni confrontate con la media generale del periodo e quella mobile su un periodo di 11 anni.

– Yearly variation of rainfall for some stations compared with the overall mean and the 11 years span average.

gamente all'afflusso medio annuo, il valore di  $F_{FAO}$  è significativamente correlato con l'altitudine della stazione ( $r = 0.81$ ,  $P < 0.01$ ). Quando il calcolo viene effettuato sui dati di ogni singola annata, l'indice in questione aumenta in maniera cospicua, incrementandosi del 23% a Fonni e quasi del 90% a Genna Silana; in quest'ultima località il valore medio di  $F_{FAO}$  diventa pari a 206, mentre solo a Uras non supera i 90. Indici superiori a 300 si sono tuttavia registrati con una certa frequenza fino al 1972; da questa data in poi valori superiori a 200 sono stati calcolati per 13 annate nelle sole stazioni di Genna Silana, Montes e Is Cannoneris.

Secondo Köppen il clima delle stazioni esaminate è riferibile ai tipi temperati con stagione secca (Tab. 2) e temperatura media del mese più caldo maggiore di  $22^{\circ}\text{C}$  (sigla  $Cs a$ ), eccetto Genna Silana, più fresca, ma con almeno 4 mesi con temperatura media superiore a  $10^{\circ}\text{C}$  ( $Cs b$ ).

La classificazione di Thornthwaite applicata a suoli con 100 mm di acqua utile per le piante (Tab. 2) evidenzia per l'annata media tipologie che vanno dal clima subarido (sigla  $C_1$ : Ales e Budoni) al tipo umido ( $B_2$ : Genna Silana). Tenuto conto delle condizioni di deficit idrico estivo e del-

l'efficienza termica, l'inquadramento ottenuto coincide praticamente con quello della classificazione precedente. Utilizzando le medie dei valori annuali degli indici di umidità, di aridità e di umidità globale, anziché quelli relativi all'annata meteorologica media, l'unica variazione si osserva a Genna Silana con un aumento dell'entità della stagione secca. La classificazione secondo Thornthwaite delle singole annate presenta tipi più frequenti identici o analoghi a quelli dell'annata media solamente ad Ales, mentre nelle altre località l'annata media è di solito più umida rispetto a quella più frequente. Il tipo semiarido (D) si verifica in quasi tutte le stazioni (eccetto Genna Silana, Fonni e Is Cannoneris) con frequenze che variano da 1-2 a ben 20 anni di Budoni, dove rappresenta la classe modale.

Secondo la classificazione fitoclimatica di Pavari l'annata media varia dal *Lauretum medio* e *freddo* al *Castanetum freddo* senza siccità estiva (Tab. 2); nella maggior parte delle stazioni si verificano le condizioni del *Castanetum caldo* con siccità estiva. Classificando le singole annate, il tipo e sottotipo più frequenti concordano sostanzialmente con l'inquadramento precedente. Fanno eccezione Fonni, che presenta un eguale numero di annate classificate nel tipo *caldo* con siccità estiva ed in quello *freddo* senza aridità del *Castanetum*, e Budoni, con condizioni tipiche del *Lauretum medio* leggermente più frequenti rispetto al tipo *caldo* della stessa fascia fitoclimatica.

L'analisi dei diversi indici climatici sintetizzati nelle Tab. 2 e 4 mette in evidenza che il pluviofattore di Lang è inferiore a 50 ad Ales e Budoni e compreso fra 60 e 90 nelle altre località; esso risulta ben correlato con l'altitudine ( $r = 0.97$ ;  $P < 0.01$ ). L'indice di continentalità di Gams è compreso fra 2 e 60 ed individua quindi un clima prevalentemente di tipo sub-continentale. Marrubiu, Uras, Torpè e Budoni vengono classificate come località «costiere», mentre Mazzinaiu, Mamoiada, Orgosolo, Montes, Is Cannoneris, Fonni, Zuighe, Alà dei Sardi e Genna Silana presentano caratteristiche pluviometriche di tipo «montano»; per le rimanenti stazioni valgono invece condizioni di ambiente «collinare». L'indice di De Martonne ed ancor più quello di De Martonne-Gottman individuano due zone climatiche abbastanza distinte: quella della prateria per Ales e Budoni e quella di tipo più forestale delle stazioni rimanenti. Il quoziente pluviometrico di Emberger indica per Ales e Budoni condizioni riferibili al clima mediterraneo di tipo temperato e di tipo nettamente umido ad Alà dei Sardi e Zuighe, mentre Is Cannoneris, Fonni e Genna Silana ricadono nel clima temperato.

L'evapotraspirazione potenziale (ETP) media annua stimata secondo Thornthwaite varia dai 680 mm circa di Genna Silana agli 850 mm di Budoni (Tab. 2). Nonostante la scarsa attendibilità del metodo di Thornthwaite nel quantificare le perdite per evapotraspirazione (CAZORZI *et al.*, 1987), anche sull'esempio di altri Autori (FAO-UNESCO, 1977;

AMORIELLO e COSTANTINI, 1999, RIVAS-MARTINEZ *et al.*, 2001), si è comunque preferito prendere questa stima per le ulteriori elaborazioni.

La classificazione bioclimatica di RIVAS-MARTINEZ *et al.*, 2001 (Tab. 2) consente di caratterizzare ulteriormente il clima delle stazioni esaminate. L'indice di continentalità individua infatti condizioni «pienamente oceaniche» in tutte le località. L'indice ombrotermico del bimestre più caldo colloca le stazioni nel macrobioclima mediterraneo; l'indice ombrotermico annuo definisce invece un ombrotipo umido (*Hum*) per Alà dei Sardi, Genna Silana, Zuighe e Is Cannoneris, un tipo subumido (*Shu*) per Ales e Fonni ed uno secco (*Dry*) per Budoni. Gli indici precedenti inquadrano tutte le stazioni nel bioclima mediterraneo di tipo pluviostagionale oceanico (*Mepo*); l'indice di termicità compensato individua soprattutto il termotipo «mesomediterraneo» (*Mme*), con escursioni nel «termomediterraneo» (*Tme*) e «supramediterraneo» (*Sme*). Sulla base di questa classificazione si può riconoscere quindi una notevole articolazione climatica, in termini di ombro- e termotipo, anche se stupisce il fatto che stazioni tanto «distanti» come Ales e Fonni si ritrovino nella stessa tipologia.

L'indice *Monthly Cold Stress (MCS)* di MITRAKOS (1982) per l'annata media manifesta condizioni di stress termico invernale molto modeste a Budoni, consistenti a Is Cannoneris e Ales, piuttosto rilevanti a Fonni e soprattutto a Zuighe, Alà dei Sardi e Genna Silana, dove sussistono limitazioni da freddo allo sviluppo vegetativo da ottobre a maggio (Tab. 5). L'indice appare inoltre abbastanza legato all'altitudine ( $r = 0.77$ ;  $P < 0.05$ ).

L'indice *Monthly Drought Stress (MDS)* di MITRAKOS (1982) per l'annata media (Tabb. 4 e 5) evidenzia condizioni di aridità abbastanza sostenute per le 3 stazioni montane e per Zuighe, Mazzinaiu e Alà dei Sardi (da giugno a settembre), forte siccità ad Ales, Villaverde, Mogorella, Is Cannoneris e Mamoiada ed aridità molto spinta nelle restanti stazioni (da maggio a settembre). Da notare che questo indice risulta significativamente ( $P < 0.01$ ) correlato con gli altri indicatori di stress idrico, ed in particolare con il rapporto  $P/ETP$  ( $r = -0.90$ ), con l'indice di aridità di Bagnouls e Gausson ( $r = 0.95$ ) e con quello di stress idrico ( $r = 0.97$ ) derivato da AMORIELLO e COSTANTINI (1999). Calcolando l'indice come valore medio delle singole annate del periodo, l'informazione associata all'*MDS* assume tuttavia un significato completamente differente, dal momento che tutti i valori subiscono un notevole aumento (Tabb. 4 e 5). L'indice di stress da aridità calcolato per i soli mesi estivi risulta complessivamente pari a poco più del 60% di quello annuale ed inversamente correlato con quello ombrotermico del bimestre più secco di Rivas-Martinez, ( $r = -0.90$ ;  $P < 0.01$ ).

Il rapporto  $P/ETP$  risulta superiore a 0.75 nella maggior parte delle stazioni, individuando condizioni più o meno accentuate di umidità per l'annata

Tabella 5 – Indici di stress termico ed idrico calcolati per le 7 stazioni termo-udometriche nel periodo 1951 - 2001.

– *Thermal and water stress indexes computed for the 7 thermopluviometric stations for the 1951 – 2001 period.*

	Is Cannoneris	Ales	Fonni	Zuighe	Budoni	Alà dei Sardi	Genna Silana
MCS di Mitrakos							
somma indici mensili	221	219	287	318	81	341	357
periodo con MCS >=5	nov-apr	nov-apr	nov-apr	nov-mag	dic-mar	ott-mag	ott-mag
MDS anno medio							
somma indici mensili	209	236	161	185	284	176	168
periodo con MDS >=5	giu-ago	mag-set	giu-set	giu-set	mag-set	giu-set	giu-ago
MDS media annua del periodo							
somma indici mensili	345	393	291	332	463	311	353
N° mesi con MDS >=5	5	6	5	5	7	5	5
somma mesi estivi	237	237	192	211	229	197	216
estate (% su tot annuo)	72%	63%	67%	65%	52%	65%	64%
P/ETP FAO	1,3	0,8	1,3	1,1	0,7	1,3	1,5
indice di Bagnouls e Gaussen	78,5	97,5	44,0	56,1	102,2	46,9	47,1
indice da Amoriello e Costantini	0,56	0,61	0,53	0,57	0,63	0,55	0,55
N° max gg estivi consec. asciutti	N. D.	114	83	N. D.	101	101	93
anno in cui si è verificato l'evento	N. D.	1966	2001	N. D.	1962	1957	1971

media (Tab. 5). Considerando le singole annate la media dell'indice non varia sostanzialmente rispetto a quello dell'annata media; la correlazione con gli altri indici di stress idrico di Tab. 5 è sempre significativa per  $P < 0.02$ .

L'indice di aridità di Bagnouls e Gaussen identifica l'assenza di condizioni di aridità a Fonni, Alà dei Sardi e Genna Silana, mentre solo a Budoni viene superata la soglia di 100 (Tab. 5). La media annua del periodo comporta un aumento notevole dell'indice; nel complesso il 90% delle annate analizzate ha superato la soglia di 50, considerata come il livello più basso di aridità per l'applicazione del modello delle ESAs (*Environmental Sensitive Areas to Desertification*) messo a punto da KOSMAS *et al.* (1999).

L'indice di stress idrico derivato dal valore di evapotraspirazione relativa di AMORIELLO e COSTANTINI (1999) è risultato molto ben allineato con gli indici precedenti: come media del periodo considerato, più del 50% del totale annuo dell'ETP non è compensato da adeguate precipitazioni e deve essere attinto dalla riserva edafica, con condizioni più aride a Budoni ed Ales e quelle più «umide» a Fonni (Tab. 5).

Tra maggio e settembre il numero massimo assoluto di giorni consecutivi privi di precipitazioni è stato di quasi 120 a Montevechio; la durata massima di tale periodo asciutto è stata comunque superiore a 100 giorni in tutte le altre stazioni, salvo Fonni e Genna Silana (Tab. 5). L'estensione massima del

periodo vegetativo privo di pioggia non risulta correlato con i precedenti indici; il suo significato sotto il profilo della classificazione climatica appare quindi modesto, anche perché troppo legato alla cospicua variabilità spaziale delle piogge estive ed esposto ad eventuali errori di misura.

Nel trimestre estivo il 98% dei giorni presentano condizioni di suolo asciutto (AMC I) secondo la procedura del Curve Number (SOIL CONSERVATION SERVICE, 1972). Estendendo il periodo di osservazione da maggio ad ottobre, tale proporzione non si riduce in misura sostanziale, rappresentando ancora dal 92 al 96% delle giornate. Questi valori di frequenza risultano abbastanza ben correlati con i diversi indici di stress idrico riportati in Tab. 5, in particolare con l'*MDS* estivo ( $r = 0.96$ ;  $P < 0.01$ ). Anche il numero di giorni piovosi del periodo estivo appare relativamente omogeneo, variando mediamente fra il 6 e l'11% delle giornate, e si dimostra inversamente correlato con tutti gli indici di aridità esaminati. Si conferma pertanto che la frequenza di giorni piovosi assume, indipendentemente dalla quantità degli afflussi, una certa importanza nel determinare lo stato idrico del suolo e l'eventuale presenza di stress idrici per le piante.

A partire dalle elaborazioni di cui sopra, una volta stimati il valore medio mensile della temperatura e delle precipitazioni (Tab. 3), si è proceduto all'inquadramento climatico di ciascuna delle 3 aree di indagine secondo quanto riassunto in Tab. 6. Nonostante gli oltre 500 m di differenza di quota fra Usinavà e Montes, il clima delle aree di indagine è risultato piuttosto omogeneo, ricadendo nelle stesse tipologie della classificazione di Köppen e di Pavari e con piccole differenziazioni in quelle di Thornthwaite e Rivas-Martinez. Gli indici di aridità di Bagnouls e Gaussen e di MITRAKOS (1982) evidenziano una aridità estiva leggermente più pronunciata a Monte Arci. Il confronto fra zone a macchia e rimboschite, tenuto conto delle rispettive condizioni edafiche riguardo alla capacità di acqua utile per le piante, mette in risalto che solo in quest'ultima località l'aridità estiva sarebbe più forte sotto il rimboschimento a causa soprattutto del minore spessore del terreno.

La classificazione della qualità del clima nei confronti della desertificazione del metodo di KOSMAS *et al.* (1999) evidenzia valori di aridità modesti, con indici complessivi di qualità climatica (CQI) di media rilevanza solo per le esposizioni meridionali (Tab. 6).

## CONCLUSIONI

L'impiego di dati termo-pluviometrici medi per l'inquadramento climatico di una stazione comporta una semplificazione della variabilità, spesso molto accentuata, che si osserva nelle variabili meteorologiche, in particolare

Tabella 6 – Inquadramento climatico elaborato per le aree di indagine.  
– *Climatic assessment of the experimental sites.*

	Monte Arci	Montes	Usinavà
Temperatura media annua (°C)	13,9	12,4	13,9
Temp. media mese + caldo (°C)	23,3	22,4	23,0
Temp. media mese + freddo (°C)	6,7	4,8	6,4
Precipitazione media annua (mm)	996	1106	1004
Indice concentrazione stagionale delle piogge			
inverno	1,60	1,57	1,56
primavera	1,02	0,97	1,03
estate	0,22	0,24	0,23
autunno	1,16	1,22	1,18
F-FAO	110	120	111
Classificazione climatica di Köppen	<i>C sa</i>	<i>C sa</i>	<i>C sa</i>
Classificazione di Thornthwaite			
macchia	B1s B2' b4'	B2s2 B1' b3'	B1s2 B2' b4'
rimboschimento	B1s2 B2' b4'	B2s2 B1' b3'	B1s2 B2' b4'
Fascia fitoclimatica di Pavari (#)	<i>Castanetum caldo</i> <i>sottotipo b</i>	<i>Castanetum caldo</i> <i>sottotipo b</i>	<i>Castanetum caldo</i> <i>caldo sottotipo b</i>
Pluviofattore di Lang	72	81	72
Indice di continentalità di Gams	42	57	32
Indice di De Martonne	42	49	42
Indice di De Martonne-Gottman	23	27	23
Quoziente pluviometrico di Emberger	116	64	138
ETP secondo Thornthwaite (mm)	750	708	753
Classificazione bioclimatica di Rivas-Martinez			
macrobioclima	mediterraneo	mediterraneo	mediterraneo
bioclima	Mepo	Mepo	Mepo
termotipo (°)	Mme	Mme	Mme
ombrotipo	Shu	Hum	Hum
MDS di Mitrakos			
somma indici mensili	203	166	185
periodo (MDS >=5)	giu - set	giu - ago	giu - ago
estate (% su tot annuo)	94	100	100
P/ETP FAO	1,33	1,56	1,33
Indice di Bagnouls e Gaussien	71,4	48,6	63,6
Climate Quality Index (CQI)			
esposizioni Nord	1,03	1,00	1,03
esposizioni Sud	1,30	1,26	1,30

(#): sottozona a = senza siccità estiva; sottozona b = con siccità estiva; (°): per estrapolazione.

nelle precipitazioni. In effetti si può affermare che l'annata media, ovvero quella con i valori medi del regime termo-pluviometrico, abbia probabilità alquanto remote di trovare un riscontro con la realtà. In condizioni di oscillazioni tanto pronunciate, tipiche dell'ambiente mediterraneo in generale e della Sardegna in particolare, si è preferita l'analisi basata sui dati di ogni singola annata, esprimendo i risultati come media periodica dei vari indici,

oppure come frequenza delle tipologie estreme e della moda. In questo modo è possibile infatti evidenziare l'incidenza in senso qualitativo e quantitativo delle annate caratterizzate da combinazioni particolarmente critiche di condizioni meteo. A titolo di esempio si riporta il caso dell'inquadramento secondo Thornthwaite per Budoni, in cui l'annata media viene classificata nel tipo C1 (subumido), mentre la moda ricade decisamente nel tipo D (semiarido), con una escursione in E (arido) nel corso di quasi un trentacinquennio.

Merita ancora rilevare come l'analisi delle singole annate, allargata ad un congruo periodo di tempo, denunci l'esistenza, a partire dagli anni Sessanta, di un trend positivo per la temperatura media annua (circa 0.4°C per decennio) ed uno negativo molto più marcato per la piovosità, con una diminuzione della media periodica riferita a 10 o 20 anni di 80 mm circa per decennio.

La risposta dei diversi indici di aridità saggiati è risultata piuttosto omogenea, nonostante che alcuni si basino su dati termo-pluviometrici (Thornthwaite, Bagnouls e Gaussen, Rivas-Martinez) mentre altri prendano in considerazione solo le piogge (MDS di Mitrakos); risulta pertanto opportuno ricorrere a quest'ultimo metodo per la caratterizzazione degli stress idrici nel caso di stazioni dotate di sola pluviometria.

L'approccio basato sui gradienti termici e pluviometrici altitudinali per la stima delle condizioni climatiche dell'annata media di una determinata località, a partire dai dati meteorologici di stazioni limitrofe, ha prodotto risultati più che soddisfacenti, con scarti mensili inferiori a mezzo grado per le temperature ed appena superiori a 15 mm per le precipitazioni, a seconda del numero e della distribuzione spaziale delle stazioni considerate. Il quadro climatico risultante per le 3 aree di indagine si è dimostrato piuttosto omogeneo, con una certa predisposizione nei confronti dei fenomeni di desertificazione limitatamente alle esposizioni meridionali.

#### RINGRAZIAMENTI

Gli Autori sono grati all'ing. G. Puligheddu ed al geom. A. Vargiu del Settore del Servizio Idrografico della Regione Autonoma della Sardegna per aver reso disponibili i dati meteorologici.

#### SUMMARY

##### **Reforestation effects in dry areas of Sardinia. Climatic classification of experimental sites**

A detailed climatic analysis of weather data has been performed for 17 meteorological stations in Sardinia; this information has been extrapolated in order to

estimate the climatic features of three experimental sites in which investigations about the effectiveness of conifer plantation in controlling desertification processes, compared to the natural vegetation, were carried out. For the average weather year, all the stations fall into the mediterranean bioclimate (oceanic pluviseasonal) of the Rivas-Martinez classification, with a rate between precipitation and potential evapotranspiration which is almost always over the threshold of subhumidity. From the observation of the meteorological data set it is possible to conclude that, starting from the early Sixties, the mean yearly temperature shows a trend towards an increase of about half a degree centigrade per decade; this is associated with a reduction of some 8 mm per year of the total rainfall. All the indexes adopted to test the occurrence of water stresses provide substantially similar information and clearly separate the mountain locations from the two ones closest to the sea. In the analyzed time period, the climatic indexes show a great variation among years, with the occurrence of years particularly crucial for vegetation development. Climatic conditions of the three sample sites, estimated through regression models, seem to be quite homogeneous and such as to be related to the warm belt of *Castanetum* with summer drought and, considering soil conditions, to the humid types of Thornthwaite classification.

#### BIBLIOGRAFIA

- AMORIELLO T., COSTANTINI A., 1999 – *Calculation of meteorological stress indices for Italian forest ecosystems* – Annali Ist. Sper. Selvicoltura; Arezzo; 30: 129-134.
- ARANGINO F., ARU A., BALDACCINI P., VACCA S., 1986 – *I suoli delle aree irrigabili della Sardegna* – Regione Sardegna, Ente Autonomo del Flumendosa, Cagliari.
- ARNOLDUS H.M.J., 1977 – *Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco* - Assessing Soil Degradation, Bull. 34, FAO, Roma: 39-48.
- BIANCHI L., CALAMINI G., GREGORI E., PACI M., PALLANZA S., PIERGUIDI A., SALBITANO F., TANI A., VEDELE S., 2002 – *Valutazione degli effetti del rimboschimento in zone aride della Sardegna: risultati preliminari sulla vegetazione* – L'Italia Forestale e Montana, 4: 353-368.
- BLASI C., 1998 – *Clima e fitoclima* – in: Pignatti, «I boschi d'Italia: Sinecologia e biodiversità»; UTET, Torino: 33-71.
- BORSELLI L., 1989 – *Previsione dei deflussi superficiali su versante: Il metodo S.C.S. Curve Number e sua applicabilità nell'ambiente collinare italiano* – Quaderni di Scienza del Suolo, CNR, II: 145-160.
- CAZORZI F., DALLA FONTANA G., FATTORELLI S., 1987 – *Indagine comparativa sui metodi per la stima dell'evapotraspirazione potenziale* - Quaderni di Idronomia Montana 7, AIDI, Padova.
- ENNE G., ZUCCA C., 2000 – *Indicatori di desertificazione per il Mediterraneo Europeo: Stato dell'arte e proposte di metodo* – ANPA, Università di Sassari, Ministero dell'Ambiente, UNCCD.
- FAO-UNESCO, 1977 – *World of desertification* - United Nations Conference on Desertification.
- KOSMAS, C., KIRKBY, M., GEESON, N., 1999 – *Manual on key indicators of*

- desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification* - European Commission, EUR 18882.
- MARCHETTI M., REMOTI D., FINIZIO C., 1987 – *Fasce fitoclimatiche: modello matematico a cartografia automatica* – Monti e Boschi, 3: 11-16.
- MITRAKOS K., 1982 – *Winter low temperatures in mediterranean-type ecosystems* - Ecologia Mediterranea, VIII, (1-2): 95-102.
- PINNA , 1977 – *Climatologia*- UTET, Torino.
- RIVAS-MARTINEZ S., SÁNCHEZ-MATA D., COSTA M., 2001 – *Worldwide Bioclimatic Classification System* - [www.ucm.es/info/cif/book/keys\\_02.htm](http://www.ucm.es/info/cif/book/keys_02.htm).
- SOIL CONSERVATION SERVICE, 1972 – *National Engineering Handbook: Hydrology* - U.S. Department of Agriculture, Washington.