

V. ANALISI AGROCLIMATICA¹

1. Pluviometria

1.1. *Pluviometria annuale*

Poiché nel Sahel i fattori climatici diversi dalla pluviometria non subiscono grandi variazioni, quest'ultima resta praticamente il principale indice climatico della produttività agricola. La variabilità e la probabilità del livello pluviometrico annuale diventano quindi determinanti, con la conseguenza peraltro che le medie assumono scarso significato se non sono accompagnate, nella misura del possibile, da calcoli di variabilità annuale dai quali si possano dedurre degli indici di probabilità. Due diversi metodi sono stati usati per calcolare variabilità e probabilità su un periodo di 30 anni, dal 1931 al 1960² (Fig. 1).

¹ FAO/UNESCO/WMO « Interagency Project on Agroclimatology - Technical Report on a Study of the Agroclimatology of the Semiarid Area south of the Sahara in West Africa », di J. Cochemé meteorologo e P. Franquin agronomo, edito dalla FAO nel 1967. Lo studio è riassunto nella « Technical Note No. 86 » dell'OMM (Organizzazione Meteorologica Mondiale), Ginevra 1967. Per la nostra analisi ci siamo basati su questo importante studio generale, l'unico esistente, e che comprende sia la zona saheliana che quella sudanese; purtroppo non vi è incluso il Sudan, sennonché 4000 km di Sahel su un totale di 5700 sono sufficienti per consentire eventuali estrapolazioni da controllarsi sui dati locali di quel paese. Poiché a questo documento non è possibile rimandare il lettore in quanto esaurito e non ristampato, abbiamo ritenuto necessario di riassumerne tutto l'essenziale.

² I due metodi sono quello empirico dei 'quintili' sulla base delle 'Normali Climatologiche' (CLINO) pubblicate dall'OMM; e il metodo teoretico utilizzando la funzione della distribuzione 'normale' o di Gaussian, fondato sui due parametri della media e dello scarto standard. Questo secondo metodo è forse più sicuro in quanto le irregolarità del campione si annullano reciprocamente. La rispondenza del campione trentennale alla distribuzione normale di Gaussian fu constatata comparando i valori del dato di mezzo (mediano) con la media, e controllando la posizione dei valori nella serie: media + scarto standard e media - scarto standard; il che corrisponde approssimativamente ai valori il cui superamento può essere previsto con una probabilità rispettivamente del 16% e dell'84%. In una distribuzione normale gli intervalli fra

$(r-r)^2$	$r-T$	r	r_n-r_{n-1}	percent					
45796	214	468.0	770	193	Median	m	669	1267	
18769	137	542.0	171.2	32	Mean	\bar{r}	682	979	
1156	34	716.2	1744	33	Mean deviation	\bar{d}	156	952	
19600	140	541.8	4149	34	Variance		36861	920	
73625	275	556.7	774	35	Standard deviation	σ	192	880	874
39204	198	880.2	3021	36	Mean sequential variation	$\frac{\sum(r_n - r_{n+1})}{n-1}$	177	820	
10816	104	578.1	1734	37					
4900	70	751.5	1868	38	Relative variability	$\frac{\bar{d}}{\bar{r}}$	22.9	784	
13689	117	564.7	32.8	39	Coefficient of variability	$\frac{\sigma}{\bar{r}}$	28.2	781	
22500	150	531.9	393	40	Relative sequential variability	$\frac{msv}{\bar{r}}$	26%	780	
33721	182	742.6	364	41				780	
51076	226	456.2	3273	42				752	
10404	102	783.5	575	43		$\frac{m-\bar{r}}{\bar{r}}$	1.9	744	
1936	44	726.0	316.0	44					
73984	272	410.0	908	45		$\bar{r} + \sigma$	874	726	
22761	181	500.8	42.5	46		$\bar{r} - \sigma$	490	716	
19321	139	543.3	118.4	47				676	
400	20	661.7	1918	48				662	669
44944	212	469.9	2966	49	PLACE BAMBEY			645	
34225	585	1266.5	2880	50	Country Senegal			578	
88109	297	978.5	58.1	51					
56644	238	920.4	1769	52				565	
3844	62	743.5	368	53				545	
9604	98	780.3	0.5	54				543	
9801	99	780.8	130.2	55				542	
1369	37	644.8	31.4	56				532	
36	6	670.2	1490	57				501	
19044	138	820.2	2448	58					
42849	207	425.4	3042	59				493	490
9604	98	779.6	5473	60				475	
1105831	4689	10444.3			TOTALS			470	
								468	
								456	
								410	

Fig. 1. Modulo standard per l'analisi di serie trentennali di pluviometria annuale. A destra ordine dei quintili con i valori mediano e dei due terzi. A sinistra calcolo della variabilità e delle serie di variabilità.

questi due valori comprenderebbero i livelli pluviometrici che ci si può attendere 2 anni su 3; mentre gli intervalli fra la media + e - lo scarto standard comprenderebbero i livelli pluviometrici che ci si può attendere 19 anni su 20. (Fig. 1).

1.1.1. DISTRIBUZIONE DELLA VARIABILITÀ

Il coefficiente di variabilità calcolato su 30 anni e su 36 stazioni meteorologiche mostra che: a) la variabilità aumenta da S a N con l'aridità; b) essa si accelera a partire dall'isoietta dei 500 mm con la più alta variabilità al limite superiore del Sahel e nella zona subsahariana; c) ci sono due regioni dove la variabilità appare anormalmente alta: il Senegal occidentale, dove il fenomeno può spiegarsi con la complessità del meccanismo meteorologico generatore di pioggia (presenza dell'aliseo marittimo); e l'area a N del lago Ciad, caratterizzata da una anormalmente bassa pluviometria media per la sua latitudine e da una anormalmente alta pluviometria nel mese di agosto; d) inoltre, contrariamente alla tendenza nei paesi aridi, il Sahel rivela un basso grado di 'asimmetria' (simmetria = serie di anni a tendenza secca compensati da pochi anni a tendenza umida) (Fig. 2).

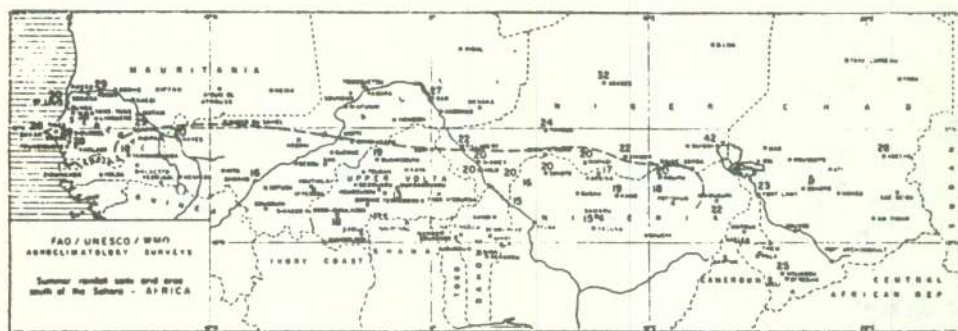


Fig. 2. Distribuzione geografica del coefficiente di variabilità. La linea tratteggiata indica la parte dell'area dove il coefficiente è inferiore a 20. (WMO - No 210.TP.110).

1.1.2. DIAGRAMMA DELLE PROBABILITÀ

È stato possibile comporre un diagramma solo per l'area fra i 1000 e i 500 mm, con un presupposto di coefficiente di variabilità del 15% a 1000 mm e del 22,5% a 500 mm, ma questo non interessa che la parte inferiore del Sahel; per l'altra parte nessun affidamento può darci il tentato diagramma che va dai 700 ai 300 mm, fondato su un presupposto di coefficiente di variabilità del 27,5% a 700 mm e del 40% a 300 mm (Fig. 3).

% occasions when exceeded	700 mm $\sigma = 157.5$		300 mm $\sigma = 120$	
	Departure	Amount	Departure	Amount
1	367	1067	280	580
5	260	960	198	498
10	201	901	154	454
20	132	832	101	401
40	39	739	30	330
50	0	700	0	300
60	-39	661	30	270
80	-132	568	101	199
90	-201	499	154	146
95	-260	440	198	102
99	-367	333	280	20

Fig. 3. Valori per la costruzione di un diagramma di probabilità fra 700 e 300 mm con un coefficiente di variabilità che aumenta dal 27,5% al 40% (potrebbe forse essere applicabile al Senegal occidentale e alla zona del lago Ciad).

1.2. Pluviometria mensile

1.2.1. VARIAZIONI STAGIONALI DELLE MEDIE MENSILI

Le medie mensili sono senz'altro l'indice migliore delle variazioni medie annuali. In tutto il Sahel si registra il massimo delle piogge nel mese di agosto, in armonia col quadro meteorologico generale (cap. IV). Anche se il livello pluviometrico differisce da una stazione all'altra, il modello è sempre il medesimo (Fig. 4).

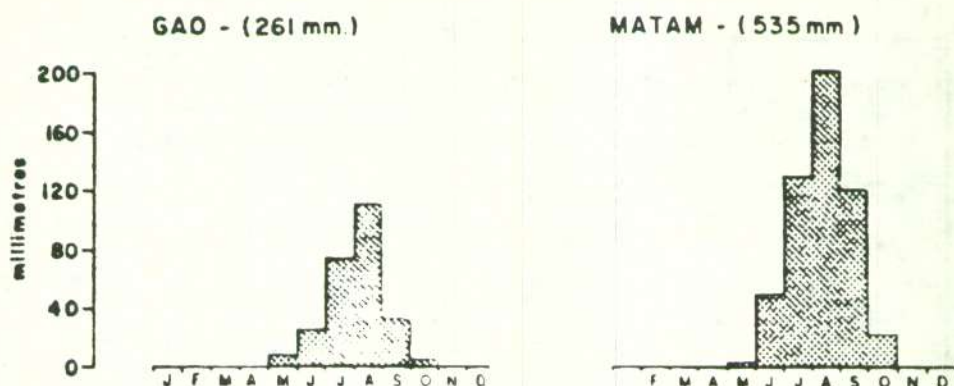


Fig. 4. Istogrammi di medie pluviometriche mensili all'interno della pluviometria annuale in due stazioni sabeliane.

Le superfici di distribuzione dei livelli pluviometrici mensili mostra le medesime variazioni stagionali zionali, decrescenti da S a N (Fig. 5).

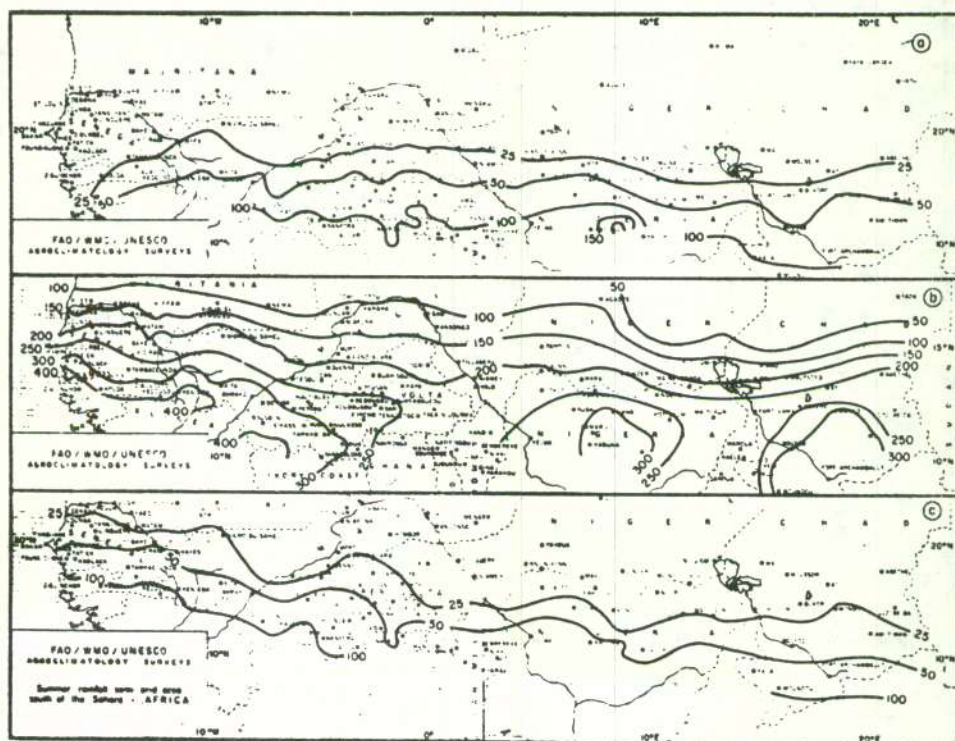


Fig. 5. Medie pluviometriche mensili: a) maggio; b) agosto; c) ottobre (Météorologie Nationale, 1958). Ciò rappresenta l'inizio, il culmine e la fine della stagione delle piogge. (WMO - No 210.TP.110).

Da notare che quando il terreno è saturato ogni quantità d'acqua in eccedenza all'evaporazione potenziale tende a scorrere via. Ciò si verifica ovunque nel mese di agosto. Per qualsiasi livello pluviometrico annuale le condizioni ottimali in relazione alle colture secche sarebbero una distribuzione equilibrata delle piogge, senza un eccesso in agosto (questa concentrazione può rappresentare un vantaggio unicamente nei terreni di bonifica e nei pascoli perenni). La concentrazione di agosto comunque aumenta da S a N ed è massima nel Sahel (Fig. 6).

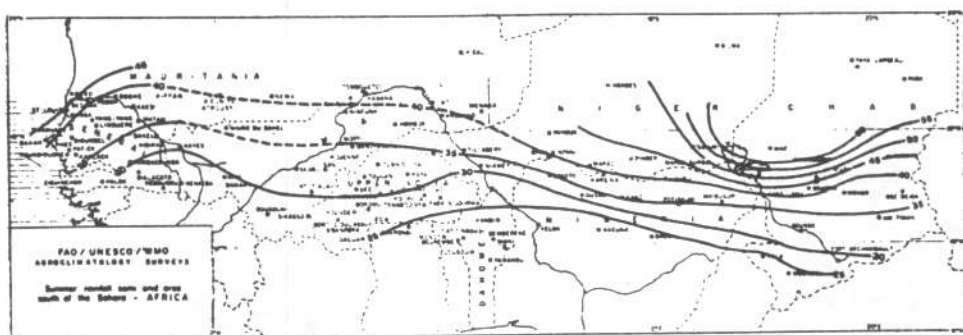


Fig. 6. Superficie di distribuzione del rapporto fra la pluviometria del mese di agosto e la media annuale. Anche qui si notano dei massimi per il Senegal e la zona a N del lago Ciad. (WMO - No 210.TP.110).

Nella progettazione delle colture un mese è un periodo troppo lungo, specie quando il ciclo vegetativo può essere di soli 80 giorni (miglio), per cui si dovrebbe poter valutare la pluviometria sulla base della decade, della settimana o della pentade. Ciò non è possibile per il Sahel a causa dell'alta variabilità, mentre per le zone poste più a S un campione di 30 anni non sembra sufficiente.

1.2.2. VARIABILITÀ DELLE MEDIE MENSILI E INFERIORI AL MESE

Il metodo empirico per il calcolo della variabilità e delle probabilità è utilizzabile anche per la pluviometria mensile con qualche riserva e con molto lavoro, per cui i campioni sono pochi (CLINO). Le medesime difficoltà a maggior ragione si incontrano per periodi inferiori al mese.

1.3. Intensità delle precipitazioni

L'intensità delle precipitazioni ha effetti sulla quantità d'acqua che si rende disponibile per le colture.

1.3.1. MEDIA NELLE 24 ORE

Nelle zone aride la media di pioggia per giornata piovosa non si allontana molto dai 14 mm (per es. Zinder: pluviometria annuale 531 mm, giorni di pioggia 30, media per precipitazione 15,1 mm). Con l'aumento della media pluviometrica si ha

un aumento dei giorni di pioggia piuttosto che dell'intensità, il che conferma come le precipitazioni siano dovute soprattutto alle linee di perturbazione dove l'intensità è molto costante. Inoltre le variazioni mensili a una stessa stazione sono maggiori di quelle da una stazione all'altra. Vi è tuttavia ovunque una variazione stagionale della media mensile per giorno di pioggia con quantitativi minori all'inizio e alla fine.

1.3.2. MASSIMI NELLE 24 ORE

Da un'analisi di 71 stazioni (Senegal, Mali, Burkina Fasso, Niger, Ciad) su serie di anni per un totale di 982, eseguita col metodo matematico della distribuzione normale (Brunet-Mont dell'ORSTOM, 1963) si deduce che il massimo giornaliero che ci si può attendere una volta all'anno intorno all'isoieta dei 500 mm è di 50 mm, e intorno all'isoieta dei 300 mm di 40 mm (Fig. 7).



Fig. 7. Le linee in tratteggio indicano la pluviometria media annuale, e le linee continue i massimi che ci si può attendere nelle 24 ore una volta all'anno.

Si può constatare che il calcolo matematico è molto vicino alle rilevazioni reali di stazione (Fig. 8).

		millimetri					
<u>Senegal</u>	a	b	c		d		e
			(i)	(ii)	(i)	(ii)	
ST. LOUIS	34	359	52	51	86	76	173
MATAM	42	522	60	59	95	97	184
DAKAR-YOFF	15	591	64	67	107	94	225
BAMBEY	32	693	70	69	118	120	254
TABACOUNDA	37	918	70	70	109	111	209
<u>Mali</u>							
GAO	39	276	37	37	61	67	121
MOPTI	37	543	51	51	81	78	152
KAYES	35	754	63	64	97	95	180
BAMAKO	39	1080	69	69	108	106	207
<u>Burkina Fasso</u>							
DORI	25	546	50	50	72	71	123
OUAHIGOUYA	25	725	57	54	86	83	159
OUAGADOUGOU	10	901	64	57	100	110	189
BOBO-DIOULASSO	27	1169	69	69	102	102	180
<u>Niger</u>							
AGADES	38	173	30	30	49	43	95
N'GUIGMI	39	222	41	43	69	70	137
TAHOUA	38	396	41	41	67	62	131
ZINDER	51	501	52	51	81	76	150
NIAMEY	20	600	54	53	82	82	151

Fig. 8. Paragone tra frequenze osservate di grandi piogge nelle 24 ore e probabilità ottenute mediante serie ridotte di distribuzione normale. a) numero di anni; b) pluviometria annuale; c) massimo osservato (i) e calcolato (ii); d) massimo in 5 anni osservato (i) e calcolato (ii); e) probabilità teorica una volta in 100 anni.

1.3.3. VARIAZIONI DIURNE

Le ore del giorno e della notte durante le quali si hanno le maggiori precipitazioni influenzano la produttività perché hanno effetti sull'evaporazione e la fotosintesi in dipendenza della temperatura e della radiazione solare. Di notte l'evaporazione è minima, non solo dell'acqua giacente sul terreno ma anche di quella cadente su terra secca la cui temperatura è inferiore a quella del giorno; d'altra parte la diminuita temperatura e l'aumentata umidità e nuvolosità che accompagnano la pioggia alla metà della giornata possono impedire l'appassimento in un'aria resa calda e secca dalla radiazione solare. Rilevazioni su 11 stazioni (Delorme, 1963) mostrano che i massimi d'intensità possono aversi in diverse ore del giorno e della notte a seconda delle stazioni. Ciò dimostra ancora una volta quanto già osservato (cap. IV), ossia

che le precipitazioni dipendono dalle linee di perturbazione e non dalle temperature diurne; le prime infatti si muovono attraverso l'area a volte per vari giorni, così che l'ora della precipitazione dipende dalla distanza della località dal punto di origine della perturbazione, mentre il suo verificarsi dipende presumibilmente dalla temperatura diurna della zona di origine (due stazioni che si trovano sullo stesso meridiano, per esempio, possono avere ambedue i massimi di notte: Zinder fra le 20 e le 2, Kano fra le 21 e le 6,30).

1.3.4. INTENSITÀ ORARIE

Le rilevazioni (Delorme, 1963) mostrano che in queste regioni la pioggia è quasi esclusivamente sotto forma di acquazzoni o rovesci e che viene ovunque con un'intensità media di 4 mm/ora, eccetto che all'inizio e alla fine della stagione (il che è fra 2 e 4 volte l'intensità riscontrabile in Europa). Tale intensità non è il risultato di precipitazioni eccezionalmente forti, ma del prevalere di precipitazioni da medie a forti. Inoltre essa è 2-3 volte inferiore alla permeabilità della maggioranza dei terreni. Ciò significa che fino a saturazione queste precipitazioni rientrano in genere nei limiti della permeabilità. Ciò significa del pari che le relativamente alte intensità medie si associano, anche per un eguale livello pluviometrico, a più insolazione durante la stagione piovosa di quello che non avvenga in regioni di minore intensità.

1.3.5. RELAZIONE INTENSITÀ-DURATA

Esso indica la quantità di pioggia in determinati intervalli specifici relativamente brevi (spells). Si è trovato che per livelli di intensità-durata egualmente alti, le intensità, specie le alte, aumentano con la diminuzione delle medie pluviometriche annuali. Nel Sahel peraltro, dove le medie annuali sono minori, la durata di queste brevi fasi intense è pure proporzionalmente minore: ciò può spiegarsi col fatto che la minore durata avviene soprattutto in conseguenza della pioggia preliminare e susseguente alla perturbazione, per cui delle stesse durate non potrebbero che essere il risultato di perturbazioni particolarmente forti, aventi una altissima intensità, dato appunto che nel caso di queste, più è alta l'intensità più è breve la durata.

1.3.6. VARIABILITÀ SPAZIALE DELLE FASI

In materia di variabilità spaziale delle fasi bisogna distinguere il piano locale dal piano geografico. Per brevi distanze sul piano locale si deve concludere che i dati di una stazione, anche se situata a pochi chilometri da una coltura, non possono essere considerati rappresentativi: nel 1953 fra Niamey e il suo aeroporto (distanza 5 km) si registrò una differenza media fra le medie giornaliere del 62%, mentre nelle medie annuali delle due località la differenza era solo dell'11%. Affatto diversa è la situazione sul piano geografico. La variabilità delle fasi su grandi distanze può avere importantissime implicazioni economiche in quanto può ovviare alla generalizzazione degli eccessi, specie delle ricorrenti siccità. Per esempio un paragone fra la pluviometria annuale del Ciad (stazioni di N'Djamena, Abéché, Am-Timan) e del Senegal (stazioni di Dakar, Matam e Tambacounda) mostra un coefficiente di correlazione negativo del $-0,51$ su un periodo di 10 anni: anche se statisticamente insi-

gnificante questo coefficiente rivela che l'eccesso di precipitazioni, come anche la siccità, non hanno la tendenza a verificarsi ovunque nel Sahel nello stesso periodo di tempo. Queste differenze sono probabilmente dovute a deformazioni nel movimento a N della ZCIT, quindi alla circolazione generale dell'aria.

1.4. Analisi delle fasi umide e secche

Questa analisi è importante sia per l'equilibrio idrico delle colture che per l'attività fotosintetica.

1.4.1. FASI UMIDE

Il calcolo della media di fasi umide di un diverso numero di giorni è stato fatto sulla stazione di Zinder per il periodo 1931-1960. Si constata che un'alta proporzione di giornate piovose (33-70%) è composta di un solo giorno, o di gruppi di 2 giorni (17-28%). L'apparizione di giornate piovose isolate è minima nel mese di agosto e massima all'inizio e alla fine della stagione. La media mensile delle fasi di 3 giorni è inferiore in tutti i mesi all'1%. Per 30 anni le medie sono state le seguenti:

	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre
Giorni di pioggia	3,5	6,3	11,3	14,0	7,9	0,9
Media giornaliera (mm)	7,7	8,7	13,5	16,6	9,0	7,8

Queste frequenze delle fasi possono esprimersi in termini di percentuali di probabilità di giorni di pioggia (Fig. 9).

Z I N D E R 1931-1960						
Length of spell	1	2	3	4 to 5	6 to 8	More than 8
Probability of a rainy day due to above spells						
May	8.0%	2.9%	1.0%			
June	14.1%	4.7%	2.3%			
July	16.9%	7.1%	4.2%	3.1%	1.9%	
August	14.8%	9.2%	7.9%	9.4%	1.9%	0.1%
September	14.0%	7.4%	2.8%	2.0%		
October	1.7%	0.4%	0.3%			
Previous spell	0	1	2	3	5	8
Total probability of another rainy day after above spells						
May	11.9%	3.9%	1.0%			
June	21.1%	7.0%	2.3%			
July	33.2%	16.3%	9.2%	5.0%	1.9%	
August	43.3%	28.5%	19.3%	11.4%	2.0%	0.1%
September	26.2%	12.2%	4.8%	2.0%		
October	2.4%	0.7%	0.3%			

Fig. 9. Sopra: percentuale di probabilità di una giornata umida come effetto di una fase di una certa lunghezza (cifre in alto). Sotto: probabilità totale di un giorno di pioggia come effetto di una fase di qualsiasi lunghezza dopo un certo numero di giorni (cifre in alto). I valori della parte inferiore della tabella sono le somme, a partire dalla stessa colonna, di quelli figuranti nella parte superiore. La lunghezza delle fasi è data in giorni.

1.4.2. FASI SECCHIE

Sempre a Zinder fu fatto il calcolo delle fasi secche su un periodo di 30 anni (Fig. 10). In genere le fasi secche sono molto più lunghe di quelle umide, come del resto è giusto attendersi. Nel complesso durante la stagione umida piove solo 1 giorno su 3, mentre al culmine della stagione la metà della giornata è secca, e nei mesi di maggio e ottobre non piove per 4/5 del tempo. La lunghezza delle fasi secche deve essere tenuta presente specie per i bisogni di acqua all'inizio delle colture.

Z I N D E R 1931-1960							
Month	Length of spell in days						
	1	2 to 3	4 to 6	7 to 10	11 to 15	16 to 30	More than 30
May	0.6	0.6	0.7	0.4	0.1	0.2	0.5
June	1.2	1.8	0.9	1.1	0.6	0.2	0.06
July	3.2	2.3	1.4	0.4	0.07	0	0
August	3.1	3.1	1.0	0.3	0	0	0
September	2.7	1.7	1.2	0.01	0.1	0.05	0.3
October	0.1	0	0.07	0	0.03	0	0

Fig. 10. Medie mensili di fasi secche di una certa lunghezza durante l'estate.

1.4.3. ANNATE SECCHIE CONSECUTIVE

La successione delle fasi secche interannuali è della massima importanza perché le previsioni di cui possono fare oggetto, anche se sono di semplice tendenza, consentono di prendere adeguate misure di sicurezza (stoccaggio di cereali al livello del carré, del villaggio o della regione; riduzione delle mandrie, ecc.). Un calcolo preciso fu fatto per Bambey (Senegal), località che però è leggermente fuori zona (680 mm): si sono avuti meno di 500 mm 2 volte per 2 anni, mai per 3 anni; si sono avuti meno di 600 mm 1 volta per 2 anni, 1 volta per 3, 2 volte per 4. Per quanto riguarda il Sahel rimandiamo al nostro computo della successione delle siccità a partire dal 1828 (cap. IX), che è però basato su dati storici e idrologici, non meteorologici sinottici, dato che le stazioni meteorologiche funzionano nel Sahel solo dal 1930.

1.4.4. CONCLUSIONE

Dai dati esposti risulta chiaro che la pluviometria, il principale parametro climatico singolo per queste regioni, è distribuita su base zonale da tutti i punti di vista. A questo elemento di uniformità geografica si contrappone però quello della variabilità e dell'irregolarità le quali, anche se non di grande ampiezza, sono di grande importanza sul piano agronomico.

2. Disponibilità di acqua

2.1. Valutazione dell'evapotraspirazione potenziale

2.1.1. GENERALITÀ

Come abbiamo visto la disponibilità di acqua, sia come quantità che come distribuzione nel tempo, è di gran lunga il principale fattore agrometeorologico della

produzione agricola. Questa disponibilità peraltro non dipende unicamente dalle precipitazioni, perché la quantità di acqua piovana deve essere messa in relazione coi quantitativi destinati a evaporare, dal suolo e dalla vegetazione (evaporazione potenziale), o destinati a perdersi per ruscellamento o infiltrazione in profondità. L'evaporazione potenziale — ossia il massimo dell'evaporazione possibile — dipende dalla quantità di energia fornita dal sole per assicurare il dovuto calore latente. La quantità di acqua che risale all'interno di una pianta per evaporare attraverso il fogliame, e rendere possibili i vari processi metabolici, dipende in primo luogo dalla disponibilità al livello del sistema radicale. Tuttavia, anche se l'acqua è abbondante, la quantità evaporata dalla pianta può diminuire quando la traspirazione potenziale aumenta oltre certi limiti in conseguenza dell'appassimento delle foglie. Ma in questo caso l'evapotraspirazione potenziale non è più il quantitativo massimo di acque che la pianta può utilizzare, ma una richiesta di acqua da parte dell'ambiente atmosferico che la coltura non può interamente soddisfare. Il rapporto fra reazione e domanda può essere negativo: un'evapotraspirazione potenziale eccessiva alla metà della giornata può provocare appassimento e quindi un livello di evapotraspirazione inferiore.

2.1.2. METODOLOGIA E RILEVAZIONI

L'evapotraspirazione, reale o potenziale, può essere calcolata su varie scale nello spazio e nel tempo. Pochissime rilevazioni sono state compiute nel Sahel, ma esiste uno studio per il decennio 1953-62 su 35 stazioni, delle quali 10 sono nel Sahel (coi gradi di Lat. e Long.):

St. Louis	16°,03N — 16°,27W	Tahoua	14°,54N — 05°,15E
Matam	15°,38N — 13°,13W	Zinder	13°,48N — 09°,00E
Mopti	14°,31N — 04°,06W	Ngouigmi	14°,15N — 13°,07E
Gao	16°,16N — 00°,03W	N'Djamena	12°,08N — 15°,02E
Niamey	13°,29N — 02°,10E	Abéché	13°,51N — 20°,51E

Per questi calcoli è stata utilizzata la formula di Penman, composta di 2 termini: a) avvezione del potere essiccante dell'aria, b) energia solare disponibile; i 2 termini sono ponderati nella loro importanza relativa con un fattore che varia in base alla temperatura e alla pressione; vi sono anche 6 variabili, 2 delle quali sono geografiche e variano secondo la latitudine e il periodo dell'anno, mentre le altre 4 sono meteorologiche, ossia temperatura, tensione di vapore, radiazione solare e forza del vento³.

$$^3 E_T = \frac{\Delta/\gamma [(1-r) R_A (0,18 + 0,55^n/N) - \sigma T^4 (0,56 - 0,092 \sqrt{e d}) (0,10 + 0,90^n/N)] + 0,35 (e d - e) (1 + \frac{n}{100})}{\Delta/\gamma + 1}$$

E_o , E_T = evapotraspirazione potenziale in mm/giorno con riflettività di superficie del 5% corrispondente ad acqua libera, e del 25% corrispondente a copertura vegetale verde completa

r = riflettività di superficie

R_A = radiazione incidente fuori dell'atmosfera su una superficie orizzontale espressa in mm/giorno di acqua evaporabile (secondo lat. e periodo dell'anno)

n = durata della radiazione solare durante l'intervallo della rilevazione

N = durata massima della radiazione solare in quel periodo di tempo (secondo lat. e momento dell'anno)

σ = costante di Stefan Boltzman

2.1.3. DISTRIBUZIONE DELLE VARIABILI

I valori e le variazioni spaziali e stagionali delle variabili meteorologiche hanno importanza non solo per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale, ma anche perché fanno parte della climatologia descrittiva di queste regioni. Questi dati sono stati riassunti in una serie di carte geografiche la cui grande scala peraltro corrisponde in realtà alla precisione assai relativa che ci si poteva attendere dal tipo delle rilevazioni e dei calcoli fatti. Sono stati scelti i periodi seguenti: a) l'anno; b) i mesi aprile-ottobre, che corrispondono nel complesso alla stagione agricola; c) il mese di agosto, che ne segna il culmine; d) i mesi novembre-marzo, che costituiscono la stagione invernale secca.

Si può notare che:

- A. Le temperature, l'umidità e la radiazione solare sono distribuite per zone: il gradiente S-N della temperatura, nel complesso debole, si inverte in inverno ma non abbastanza per pareggiare le temperature medie annuali leggermente più alte del N; una media valida ovunque sono $28^{\circ}\text{C} \pm 2$ (Fig. 11).
- B. La tensione di vapore diminuisce fortemente da S a N; ha importanti variazioni spaziali e stagionali, fra gli estremi dei 28 mb nel S in agosto e dei 7 mb nel N durante l'inverno (Fig. 12).
- C. I deficit di saturazione della tensione di vapore rivelano un analogo gradiente di umidità, ma durante l'inverno le più basse temperature del N, diminuendo i valori di saturazione, pareggiano il gradiente (Fig. 13).
- D. La durata della radiazione solare, espressa nel rapporto al massimo possibile, è regolarmente alta; anche nel mese di agosto e nel S, durante le forti piogge, è del 40% (Fig. 14).
- E. La forza del vento, qui considerata unicamente in quantità scalare, è l'unica variabile non avente una distribuzione zonale; oltre a un massimo sulla costa del Senegal, mostra regolarmente un massimo nel N del Mali e un minimo nel S del Ciad (Fig. 15).

T	= temperatura media in gradi assoluti
Ed	= tensione di vapore media
Ea	= saturazione della tensione di vapore in mm mercurio
u	= vento giornaliero a 4 m dal suolo (in statue miles)
γ	= costante psicrometrica (in $\text{mb}/^{\circ}\text{C}$)
Δ	= tasso di mutamento della tensione di vapore con la temperature (in $\text{mb}/^{\circ}\text{C}$)

Essendo Δ e γ in $\text{mb}/^{\circ}\text{C}$, Δ/γ è senza dimensione.

La prima parte del numeratore, ossia il bilancio idrico (parentesi quadre) calcola la radiazione netta sottraendo la quantità di energia riflessa di ritorno verso lo spazio dalla radiazione globale in arrivo. La seconda parte del numeratore, ossia il termine aerodinamico, calcola l'avvezione del potere essiccante dell'aria in termini del suo deficit di saturazione e del suo movimento. L'importanza relativa dei due termini della formula è espressa con un fattore che aumenta con la temperatura.

Il termine $0,35 (1 + u/100)$ è stato usato di preferenza a $0,35 (0,5 + n/100)$ per tener conto della maggiore scabrosità della superficie della coltura a paragone di quella dell'acqua libera (Penman, 1963).

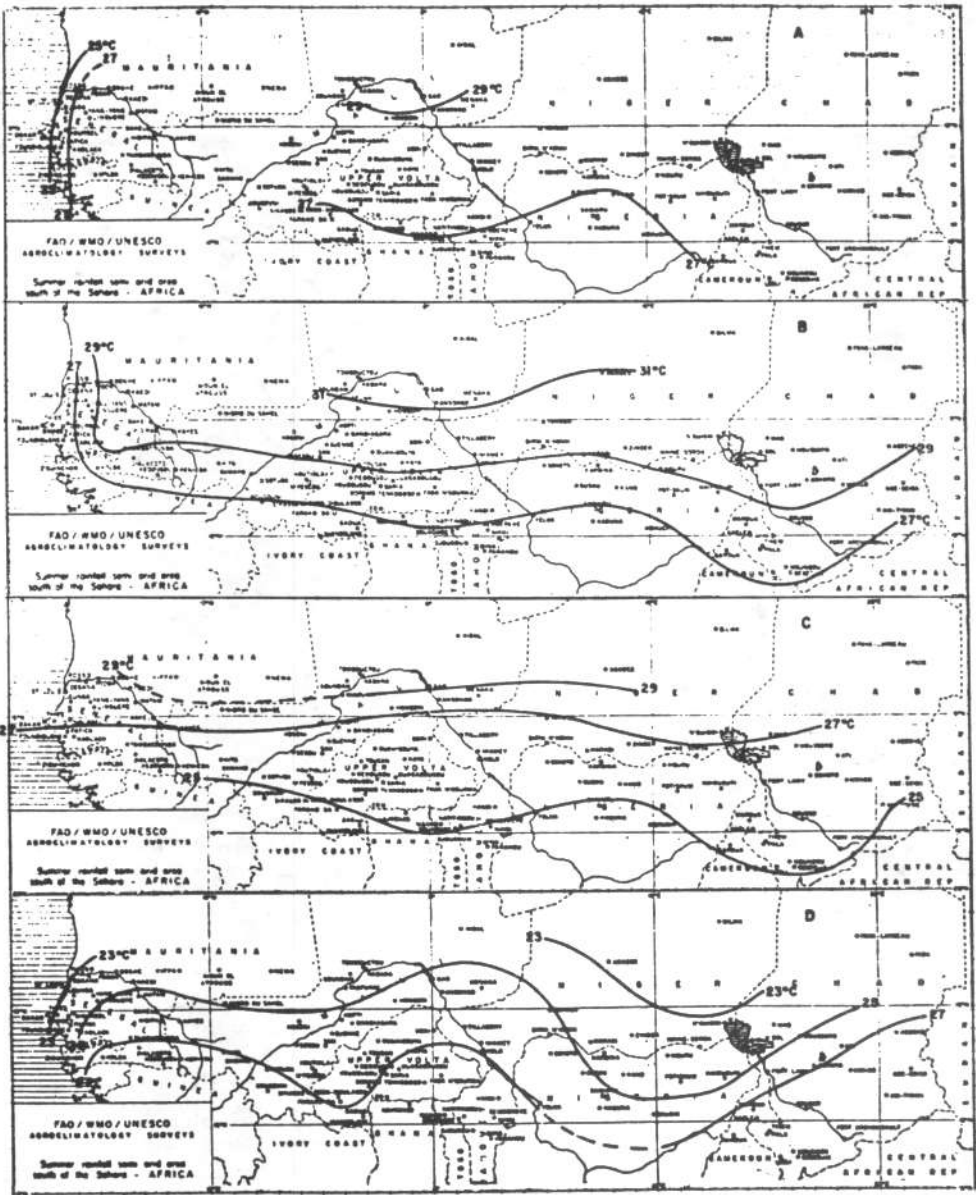


Fig. 11. Temperature medie in °C Celsius. A, anno; B, mesi aprile-ottobre; C, mese di agosto; D, mesi novembre-marzo. Il gradiente N-S è debole e si inverte durante l'inverno. (WMO - No 210.TP.110).

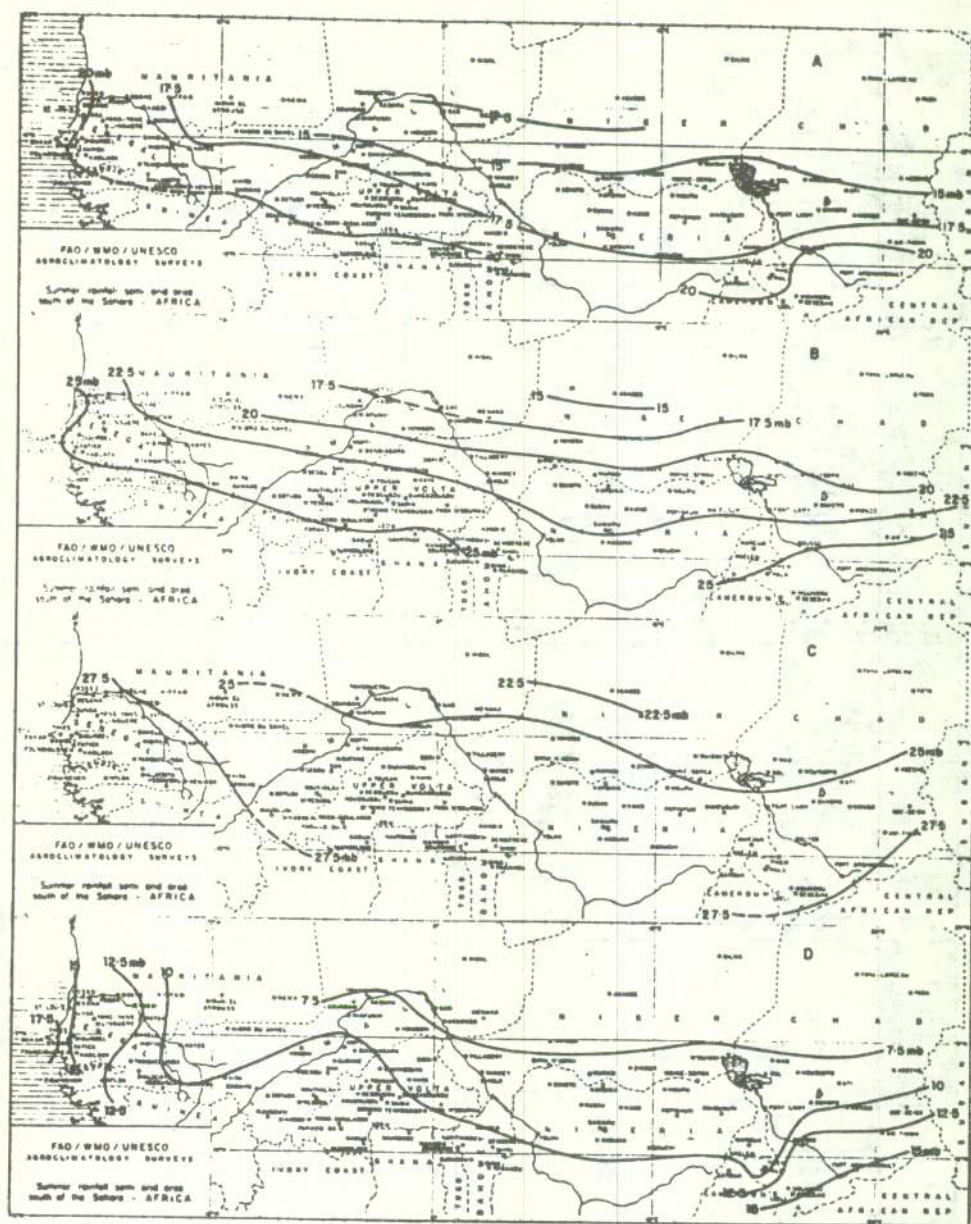


Fig. 12. Tensione di vapore media (in mb). A, anno; B, mesi aprile-ottobre; C, mese di agosto; D, mesi novembre-marzo. Le variazioni stagionali fra le estati umide e gli inverni secchi sono molto ampie, ma lo stesso gradiente si conserva ovunque. (WMO - No 210.TP.110).

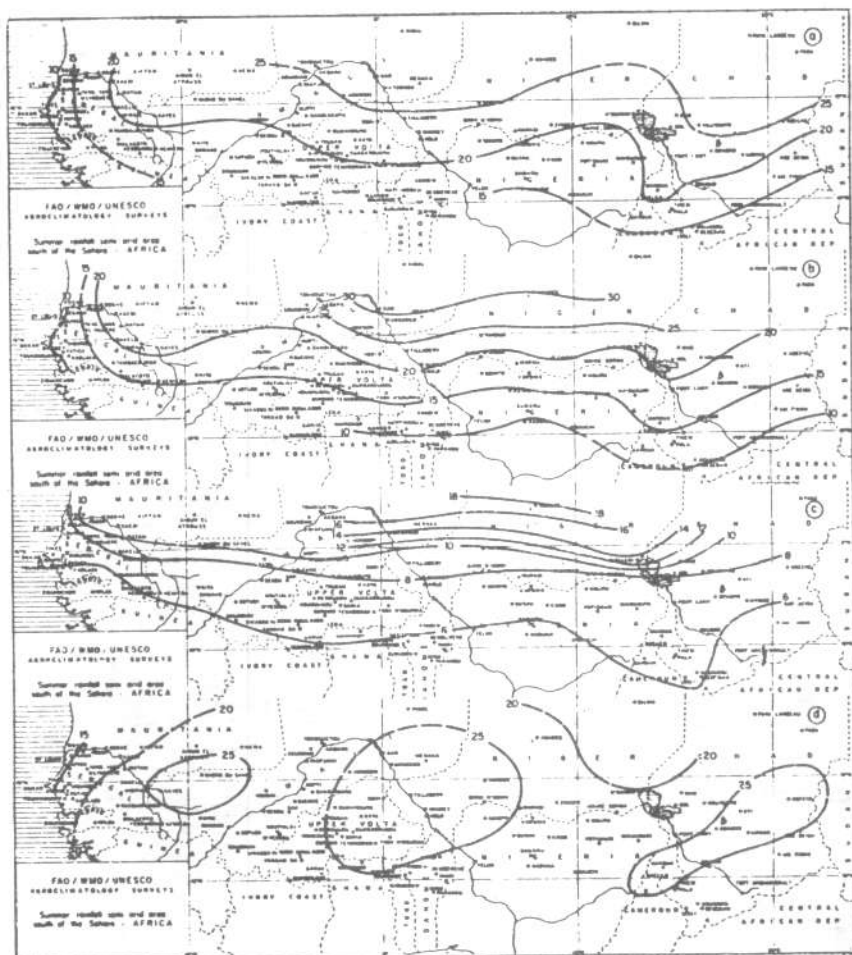


Fig. 13. Deficit medio di saturazione della tensione di vapore (in mb). A, anno; B, mesi aprile-ottobre; C, mese di agosto; D, mesi novembre-marzo. (WMO - No 210. TP.110).

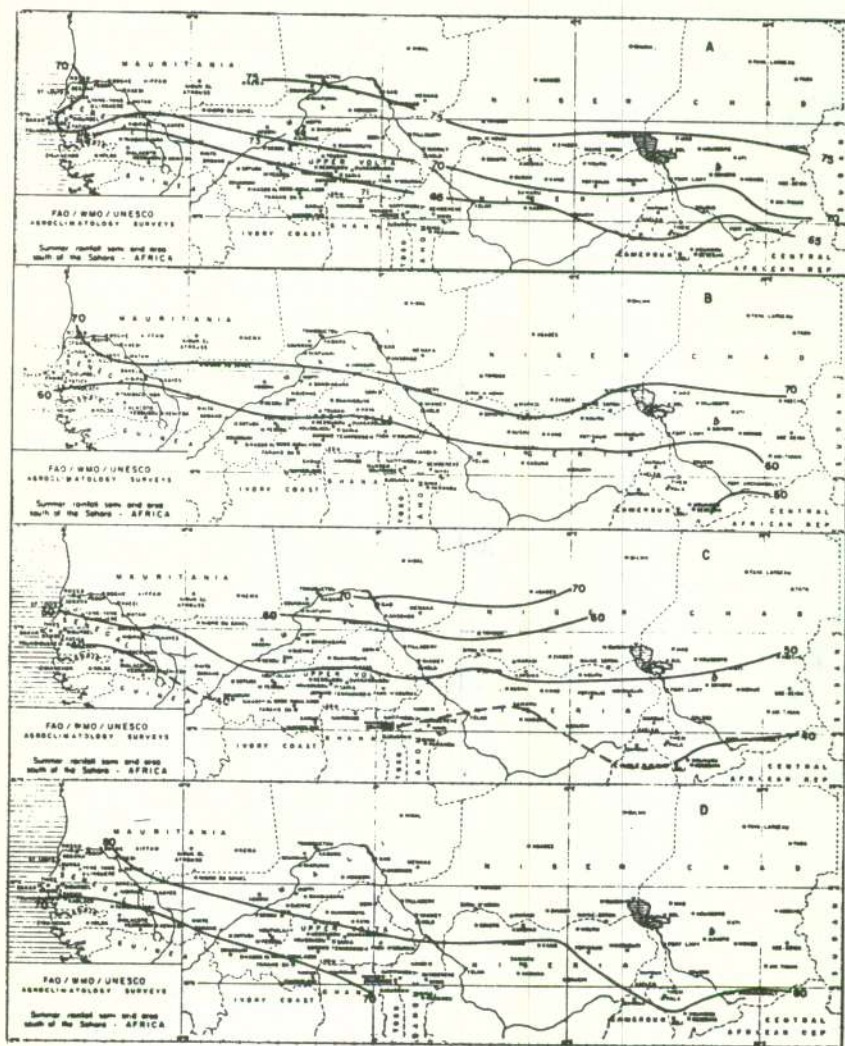


Fig. 14. Rapporto fra la luce solare osservata e la luce solare possibile espresso in percentuali. A, anno; B, stagione delle piogge estive; C, mese di agosto; D, stagione invernale. Nel complesso le percentuali del mese di agosto sono le più basse e quelle invernali le più alte (WMO - No 210.TP.110).

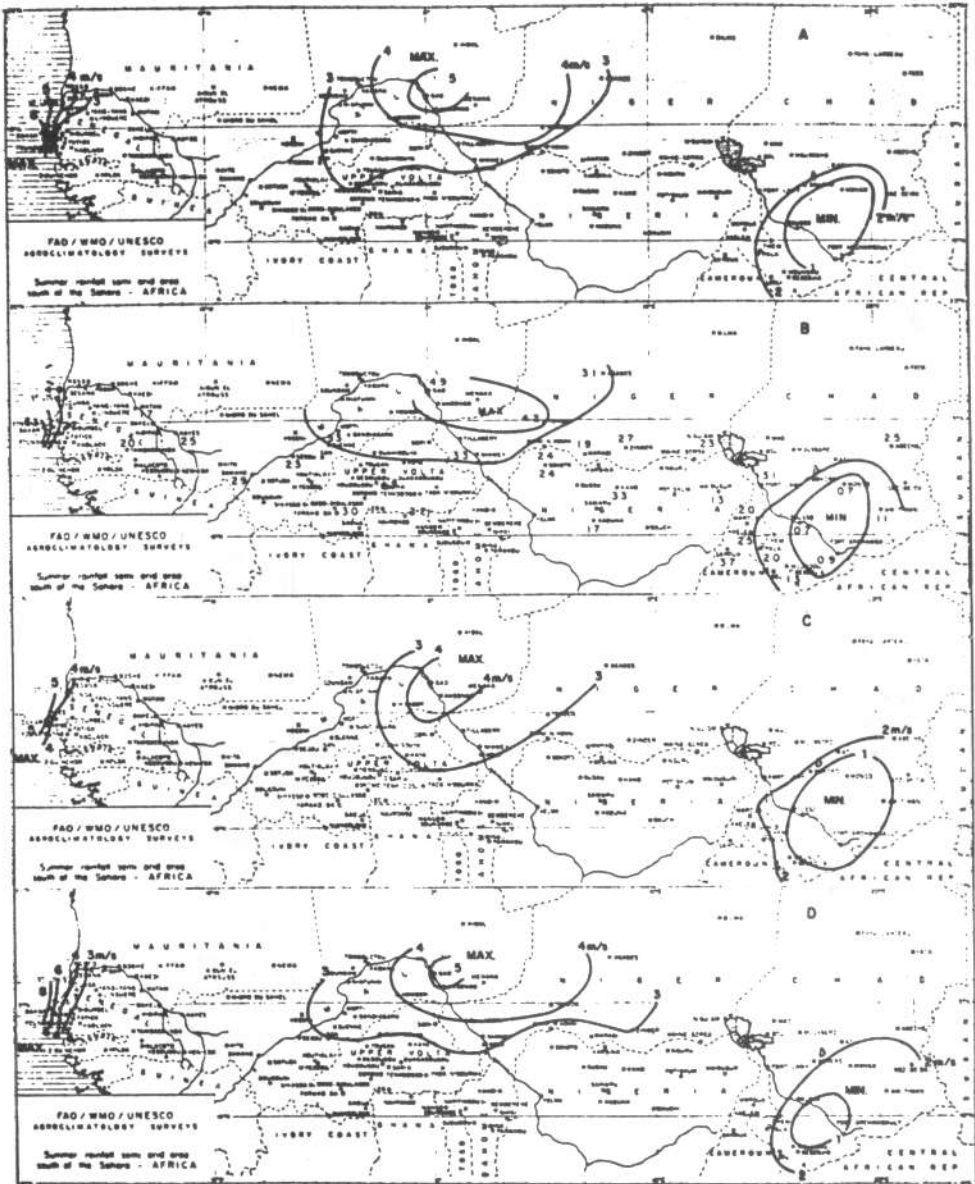


Fig. 15. Vento medio scalare a 2 m sul livello del suolo in metri/secondo. A, anno; B, mesi di aprile-ottobre, stagione delle piogge estiva; C, mese di agosto; D, mesi novembre-marzo, stagione invernale. Da notare, per tutte le stagioni, un massimo nel N del Mali, un massimo sulla costa atlantica e un minimo nel S del Ciad (WMO-No 210.TP.110).

2.1.4. VALUTAZIONI DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE

Riportiamo qui di seguito i risultati delle rilevazioni e dei calcoli dell'evapotraspirazione potenziale (in queste tabelle riteniamo utile non escludere i dati della zona sudanese, ma segnare piuttosto a margine le stazioni del Sahel).

I dati sono i seguenti:

- A. Evapotraspirazione mensile, annuale e stagionale (in mm) (Fig. 16).
- B. Evapotraspirazione potenziale mensile nelle medie giornaliere (in mm) (Fig. 17).
- C. Variazione stagionale dell'evapotraspirazione media mensile; trattandosi di clima tropicale tale variazione è caratterizzata dalle piogge estive e presenta nell'area considerata solo differenze di grado; essa è bene illustrata dal campione di N'Djamena (Fig. 18).
- D. Distribuzione dell'evapotraspirazione nello spazio, che riassume quella delle 2 variabili: livello dell'energia aerodinamica di avvezione (potere disseccante dell'aria) e livello dell'energia di radiazione netta (E_{AT}). Queste aumentano all'inizio dell'anno; più tardi invece la nebulosità, l'umidità ed eventualmente un abbassamento delle temperature causato dalle piogge monsoniche fanno diminuire i due termini, ma quello aerodinamico più presto, per un tempo più lungo e in più larga misura; dopo un secondo aumento si ritorna al più basso livello invernale; vi sono quindi 2 massimi e 2 minimi, il minimo delle piogge estive essendo più basso di quello dell'inverno secco, anche nel Sahel (Fig. 19).

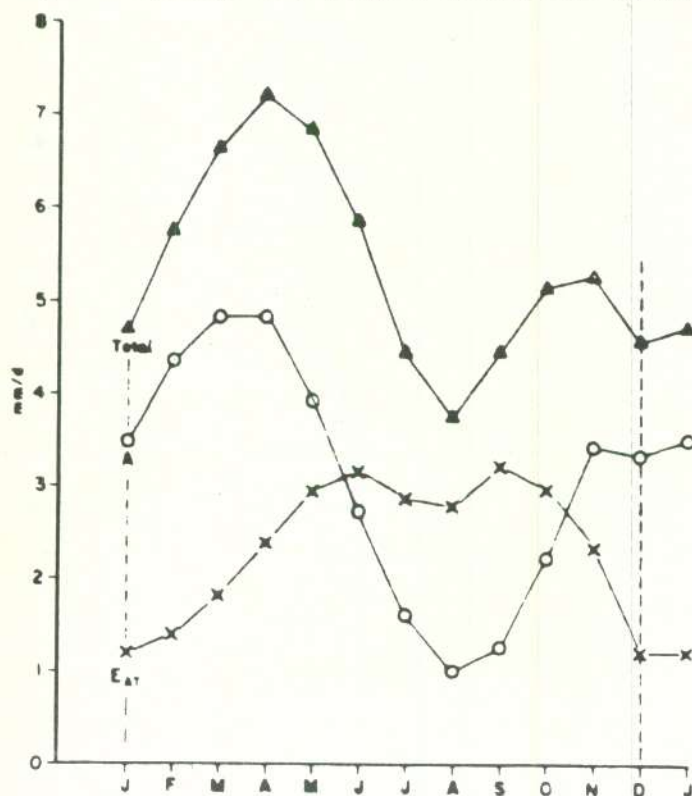
Come si vede i livelli annuali di evapotraspirazione potenziale variano dai 1500 ai 2000 mm. I quantitativi che possono evaporare durante i 5 mesi della stagione umida danno un'idea della quantità di acqua che può circolare nelle colture (e gli animali). Si vede che nel mese di agosto le quantità di evapotraspirazione sono molto minori delle quantità di pioggia, eccetto che nell'estremo N, ossia nella parte superiore del Sahel e nella zona subsahariana (Fig. 19, b e c). Durante l'inverno invece l'evapotraspirazione è irregolarmente distribuita, ma quantitativamente abbastanza uniforme attraverso l'area considerata.

Per completare i dati sull'evapotraspirazione riteniamo utile aggiungere a conclusione le seguenti tabelle:

- Medie giornaliere per i mesi dell'anno della radiazione incidente sopra l'atmosfera (Fig. 20).
- Massimo mensile di luce solare secondo la latitudine (Fig. 21).
- Radiazione solare riflessa ($0,56 - 0,092 \sqrt{e_a}$) in termini di tensione di vapore media (Fig. 22).
- Saturazione della tensione di vapore in termini di °C e mb (Fig. 23).
- Energia radiante in termini di °C e mm/giorno di acqua evaporata (Fig. 24).
- Titolo dell'inclinazione della tensione di vapore di saturazione rispetto alla costante psicrometrica in termini di °C (Fig. 25).

Senegal	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Dakar Yoff	4.45	4.78	5.15	5.76	5.36	5.15	5.14	4.45	4.44	4.44	4.44	4.44
Matam	4.45	4.78	5.15	5.76	5.36	5.15	5.14	4.45	4.44	4.44	4.44	4.44
St. Louis	4.45	4.78	5.15	5.76	5.36	5.15	5.14	4.45	4.44	4.44	4.44	4.44
Thies	4.45	4.78	5.15	5.76	5.36	5.15	5.14	4.45	4.44	4.44	4.44	4.44
Mali												
Bamako	4.45	4.78	5.15	5.76	5.36	5.15	5.14	4.45	4.44	4.44	4.44	4.44
Gao	4.45	4.78	5.15	5.76	5.36	5.15	5.14	4.45	4.44	4.44	4.44	4.44
Mopti	4.45	4.78	5.15	5.76	5.36	5.15	5.14	4.45	4.44	4.44	4.44	4.44
Ségou	4.45	4.78	5.15	5.76	5.36	5.15	5.14	4.45	4.44	4.44	4.44	4.44
Nigeria												
Maiduguri	4.66	5.68	6.48	6.95	6.70	5.74	4.34	3.64	4.32	5.04	4.96	4.27
Niger												
Birni N'Konni	4.45	4.78	5.15	5.76	5.36	5.15	5.14	4.45	4.44	4.44	4.44	4.44
Keradi	4.45	4.78	5.15	5.76	5.36	5.15	5.14	4.45	4.44	4.44	4.44	4.44
N'Goulmi	4.45	4.78	5.15	5.76	5.36	5.15	5.14	4.45	4.44	4.44	4.44	4.44
Niamey	4.45	4.78	5.15	5.76	5.36	5.15	5.14	4.45	4.44	4.44	4.44	4.44
Zahoua	4.45	4.78	5.15	5.76	5.36	5.15	5.14	4.45	4.44	4.44	4.44	4.44
Zinder	4.45	4.78	5.15	5.76	5.36	5.15	5.14	4.45	4.44	4.44	4.44	4.44
Ciad												
Abéché	4.45	4.78	5.15	5.76	5.36	5.15	5.14	4.45	4.44	4.44	4.44	4.44
Fort Lamy	4.45	4.78	5.15	5.76	5.36	5.15	5.14	4.45	4.44	4.44	4.44	4.44
Mongo	4.45	4.78	5.15	5.76	5.36	5.15	5.14	4.45	4.44	4.44	4.44	4.44

Fig. 17. Evapotraspirazione potenziale media mensile (in mm/giorno).

Fig. 18. Variazione stagionale dell'evaporazione media mensile. A, energia di avvezione; E_{AT}, energia netta [Fort Lamy (N'Djamena), Ciad].

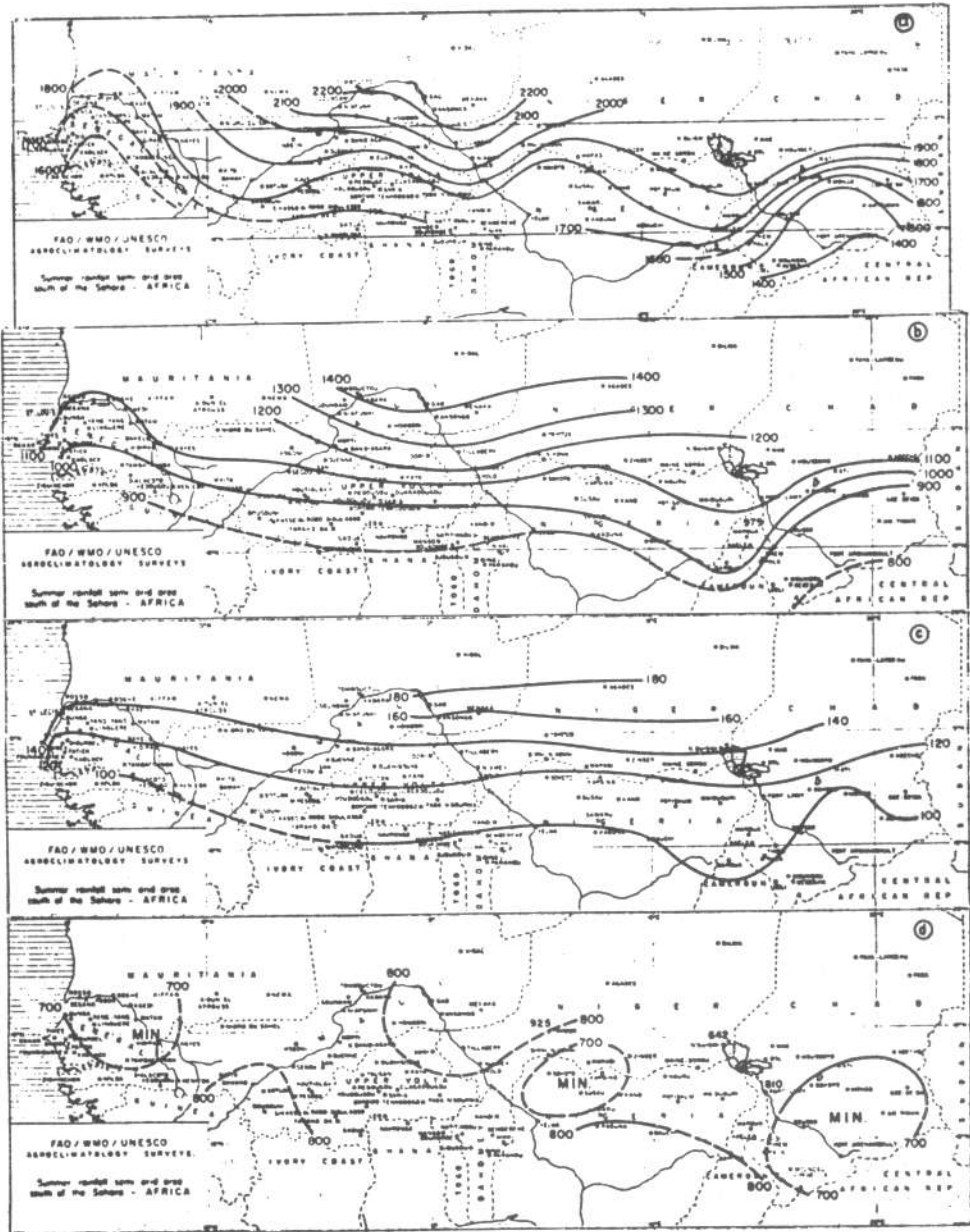


Fig. 19. Distribuzione territoriale dell'evaporazione media (E_T). A, anno; B, mesi luglio-ottobre, la stagione agricola; C, mese di agosto; D, mesi novembre-marzo (WMO - No 210.TP.110).

Lat.	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.
10	12.90 -.019	13.90 -.014	14.80 -.007	15.19 +.002	15.05 +.009	14.83 +.012	14.86 +.011	15.01 +.006	14.86 -.003	14.15 -.011	13.13 -.016	12.49 -.020
11	12.71 -.018	13.76 -.014	14.73 -.007	15.21 +.001	15.14 +.008	14.95 +.011	14.97 +.010	15.07 +.005	14.83 +.003	14.04 -.011	12.97 -.017	12.29 -.021
12	12.53 -.019	13.62 -.015	14.66 -.007	15.22 +.001	15.22 +.007	15.06 +.011	15.07 +.009	15.12 +.004	14.80 -.004	13.93 -.012	12.80 -.018	12.08 -.021
13	12.34 -.020	13.47 -.015	14.59 -.007	15.23 +.001	15.29 +.007	15.17 +.010	15.16 +.009	15.16 +.004	14.76 -.004	13.81 -.012	12.62 -.018	11.87 -.021
14	12.14 -.021	13.32 -.015	14.52 -.008	15.24 0.0	15.36 +.006	15.27 +.010	15.25 +.009	15.20 +.004	14.72 -.004	13.69 -.012	12.44 -.018	11.66 -.021
15	11.93 -.020	13.17 -.017	14.44 -.008	15.24 -.002	15.42 +.007	15.37 +.011	15.34 +.008	15.24 +.003	14.68 -.005	13.57 -.013	12.25 -.018	11.45 -.021
16	11.73 -.022	13.00 -.017	14.36 -.011	15.22 -.000	15.49 +.009	15.48 +.010	15.42 +.009	15.27 +.004	14.63 -.005	13.44 -.013	12.07 -.019	11.24 -.022
17	11.51 -.020	12.83 -.017	14.25 -.008	15.22 -.002	15.56 +.005	15.58 +.008	15.51 +.008	15.31 +.003	14.58 -.009	13.31 -.014	11.88 -.018	11.02 -.022

Fig. 20. Valori medi giornalieri per i mesi dell'anno della radiazione incidente sopra l'atmosfera in termini di gradi di latitudine espressi in mm di acqua evaporata al giorno. Le differenze figuranti fra i valori corrispondono a un centesimo di grado.

Lat.	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	F.
	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	29
10	360.0 -.17	330.5 -.09	374.4 -.02	370.6 +.07	390.0 +.15	381.0 +.18	392.0 +.17	385.8 +.10	365.4 +.02	369.2 -.07	350.3 -.14	358.3 -.18	342.4 -.10
11	358.3 -.16	329.6 -.09	374.2 -.01	371.3 +.08	391.5 +.15	382.8 +.18	393.7 +.17	386.8 +.11	365.6 +.02	386.8 -.07	348.9 -.14	356.5 -.19	341.4 -.09
12	356.7 -.16	328.7 -.09	374.1 -.01	372.1 +.08	393.0 +.15	384.6 +.18	395.4 +.17	387.9 +.11	365.8 +.02	367.8 -.06	347.5 -.14	354.6 -.18	340.5 -.09
13	355.1 -.17	327.8 -.09	374.0 -.01	372.9 +.07	394.5 +.16	386.4 +.19	397.1 +.18	389.0 +.12	366.0 +.02	367.2 -.07	346.1 -.14	352.8 -.18	339.6 -.10
14	353.4 -.17	326.9 -.09	373.9 -.01	373.6 +.08	396.1 +.15	388.3 +.19	398.9 +.18	390.2 +.11	366.2 +.03	366.5 -.07	344.7 -.14	351.0 -.19	338.6 -.09
15	351.7 -.17	326.0 -.09	373.7 -.01	374.4 +.08	397.6 +.16	390.2 +.18	400.7 +.18	391.3 +.11	366.5 +.02	365.8 -.07	343.3 -.15	349.1 -.19	337.7 -.10
16	350.0 -.17	325.1 -.09	373.6 -.01	375.2 +.08	399.2 +.16	392.0 +.19	402.4 +.18	392.4 +.11	366.7 +.03	365.1 -.06	341.8 -.14	347.2 -.19	336.7 -.09
17	348.3 -.17	324.2 -.09	373.5 -.01	376.0 +.07	400.8 +.15	393.9 +.19	404.2 +.18	393.5 +.12	367.0 +.02	364.5 -.07	340.4 -.14	345.3 -.19	335.8 -.10

Fig. 21. Massimo mensile di luce solare in termini di gradi di latitudine, espressi in ore e decimi di ora. Le differenze figuranti fra i valori corrispondono a un centesimo di grado.

e_d mb	0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
3	.422	.420	.418	.416	.414	.412	.409	.407	.405	.403
4	.401	.399	.397	.395	.393	.392	.390	.388	.386	.384
5	.382	.380	.379	.377	.375	.374	.372	.370	.368	.364
6	.365	.364	.362	.360	.359	.357	.355	.354	.352	.351
7	.349	.348	.346	.345	.343	.342	.341	.339	.338	.336
8	.335	.334	.332	.331	.329	.328	.327	.325	.324	.322
9	.321	.320	.318	.317	.316	.315	.313	.312	.311	.309
10	.308	.307	.306	.304	.303	.302	.301	.300	.298	.297
11	.296	.295	.294	.292	.291	.290	.289	.288	.286	.285
12	.284	.283	.282	.281	.280	.279	.277	.276	.275	.274
13	.273	.272	.271	.270	.269	.268	.266	.265	.274	.263
14	.262	.261	.260	.259	.258	.257	.256	.255	.254	.253
15	.252	.251	.250	.249	.248	.247	.246	.245	.244	.243
16	.242	.241	.240	.239	.238	.237	.236	.235	.234	.233
17	.232	.231	.230	.229	.228	.227	.226	.225	.224	.223
18	.222	.221	.220	.219	.218	.218	.217	.216	.215	.214
19	.213	.212	.211	.210	.209	.209	.208	.207	.206	.205
20	.204	.203	.202	.201	.200	.200	.199	.198	.197	.196
21	.195	.194	.193	.192	.191	.191	.190	.189	.188	.187
22	.186	.185	.184	.184	.183	.182	.181	.180	.180	.179
23	.178	.177	.176	.176	.175	.174	.173	.172	.172	.171
24	.170	.169	.168	.167	.166	.165	.164	.164	.164	.163
25	.162	.161	.160	.160	.159	.158	.157	.156	.155	.155
26	.154	.153	.152	.152	.151	.150	.149	.148	.148	.147
27	.146	.145	.145	.144	.143	.143	.142	.141	.140	.140
28	.139	.138	.137	.137	.136	.135	.134	.133	.133	.132
29	.131	.130	.130	.129	.128	.128	.127	.126	.125	.125
30	.124	.123	.123	.122	.121	.121	.120	.119	.118	.118
31	.117	.116	.116	.115	.114	.114	.113	.112	.111	.111
32	.110	.109	.109	.108	.107	.107	.106	.105	.104	.104

Fig. 22. Radiazione solare riflessa ($0,56-0,092 \sqrt{e_d}$) in termini di tensione di vapore media (e_d) in mb e decimi.

°C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
16	18.17	18.29	18.41	18.52	18.64	18.76	18.88	19.00	19.12	19.25
17	19.37	19.49	19.61	19.74	19.86	19.99	20.12	20.24	20.37	20.50
18	20.63	20.76	20.89	21.02	21.16	21.29	21.42	21.56	21.69	21.83
19	21.96	22.10	22.24	22.38	22.52	22.66	22.80	22.94	23.09	23.23
20	23.37	23.52	23.66	23.81	23.96	24.11	24.26	24.41	24.56	24.71
21	24.86	25.01	25.17	25.32	25.48	25.64	25.79	25.95	26.11	26.27
22	26.43	26.59	26.75	26.92	27.08	27.25	27.41	27.58	27.75	27.92
23	28.09	28.26	28.43	28.60	28.77	28.95	29.12	29.30	29.48	29.65
24	29.83	30.01	30.19	30.37	30.56	30.74	30.93	31.11	31.30	31.48
25	31.67	31.86	32.05	32.24	32.43	32.63	32.82	33.02	33.21	33.41
26	33.61	33.81	34.01	34.21	34.41	34.62	34.82	35.03	35.23	35.44
27	35.65	35.86	36.07	36.28	36.50	36.71	35.92	37.14	37.36	37.58
28	37.80	38.02	38.24	38.46	38.69	38.91	39.14	39.37	39.59	39.82
29	40.06	40.29	40.52	40.76	40.99	41.23	41.47	41.71	41.95	42.19
30	42.43	42.67	42.92	43.17	43.41	43.66	43.91	44.17	44.42	44.67
31	44.93	45.18	45.44	45.70	45.96	46.22	46.49	46.75	47.02	47.28
32	47.55	47.82	48.09	48.36	48.64	48.91	49.19	49.47	49.75	50.03
33	50.31	50.59	50.87	51.16	51.45	51.74	52.03	52.32	52.61	52.90
34	53.20	53.50	53.80	54.10	54.40	54.70	55.00	55.31	55.62	55.93
35	56.24	56.55	56.86	57.18	57.49	57.81	58.13	58.45	58.77	59.10

Fig. 23. Saturazione della tensione di vapore in termini di temperatura in °C Celsius e decimi espressa in mb.

°C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
16	13.84	13.86	13.88	13.90	13.92	13.94	13.95	13.97	13.99	14.01
17	14.03	14.05	14.07	14.09	14.11	14.13	14.15	14.17	14.19	14.21
18	14.23	14.25	14.27	14.29	14.31	14.33	14.35	14.37	14.39	14.41
19	14.43	14.45	14.47	14.49	14.51	14.53	14.54	14.56	14.58	14.60
20	14.62	14.64	14.66	14.68	14.70	14.73	14.75	14.77	14.79	14.81
21	14.83	14.85	14.87	14.89	14.91	14.93	14.95	14.97	14.99	15.01
22	15.03	15.05	15.07	15.09	15.11	15.13	15.15	15.17	15.19	15.21
23	15.23	15.25	15.27	15.29	15.31	15.34	15.36	15.38	15.40	15.42
24	15.44	15.46	15.48	15.50	15.52	15.55	15.57	15.59	15.61	15.63
25	15.65	15.67	15.69	15.71	15.73	15.76	15.78	15.80	15.82	15.84
26	15.86	15.88	15.90	15.92	15.94	15.97	15.99	16.01	16.03	16.05
27	16.07	16.09	16.11	16.14	16.16	16.18	16.20	16.22	16.25	16.27
28	16.29	16.31	16.33	16.35	16.37	16.40	16.42	16.44	16.46	16.48
29	16.50	16.52	16.54	16.57	16.59	16.61	16.63	16.65	16.68	16.70
30	16.72	16.74	16.77	16.79	16.81	16.84	16.86	16.88	16.90	16.93
31	16.95	16.97	16.99	17.02	17.04	17.06	17.08	17.10	17.13	17.15
32	17.17	17.19	17.22	17.24	17.26	17.29	17.31	17.33	17.35	17.38
33	17.40	17.42	17.45	17.47	17.49	17.52	17.54	17.56	17.58	17.61
34	17.65	17.68	17.70	17.72	17.75	17.77	17.79	17.81	17.84	17.86
35	17.88	17.90	17.93	17.95	17.97	18.00	18.02	18.04	18.07	18.09

Fig. 24. Energia radiante in termini di temperatura in °C Celsius e decimi espressa in mm di acqua evaporata al giorno.

°C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
16	1.759	1.769	1.779	1.789	1.799	1.810	1.820	1.830	1.840	1.850
17	1.860	1.871	1.881	1.891	1.902	1.913	1.924	1.934	1.945	1.955
18	1.966	1.977	1.988	1.999	2.010	2.022	2.033	2.044	2.055	2.066
19	2.077	2.089	2.100	2.112	2.124	2.136	2.147	2.159	2.171	2.182
20	2.194	2.206	2.218	2.230	2.242	2.255	2.267	2.279	2.291	2.303
21	2.315	2.328	2.340	2.353	2.366	2.379	2.391	2.404	2.417	2.429
22	2.442	2.455	2.469	2.482	2.496	2.509	2.522	2.536	2.549	2.563
23	2.576	2.590	2.604	2.618	2.632	2.646	2.659	2.673	2.687	2.701
24	2.715	2.730	2.744	2.759	2.773	2.788	2.802	2.817	2.831	2.846
25	2.860	2.875	2.890	2.906	2.921	2.936	2.951	2.966	2.982	2.997
26	3.012	3.028	3.044	3.060	3.076	3.092	3.107	3.123	3.139	3.155
27	3.171	3.188	3.204	3.221	3.237	3.254	3.270	3.287	3.303	3.320
28	3.336	3.353	3.371	3.388	3.405	3.423	3.440	3.457	3.474	3.492
29	3.509	3.527	3.545	3.563	3.581	3.599	3.617	3.635	3.653	3.671
30	3.689	3.708	3.727	3.746	3.765	3.784	3.802	3.821	3.840	3.859
31	3.878	3.898	3.917	3.937	3.956	3.976	3.996	4.015	4.035	4.054
32	4.074	4.094	4.115	4.135	4.156	4.176	4.196	4.217	4.237	4.258
33	4.278	4.299	4.320	4.342	4.363	4.384	4.405	4.426	4.448	4.469
34	4.490	4.512	4.534	4.556	4.578	4.600	4.622	4.644	4.666	4.688
35	4.712	4.735	4.758	4.781	4.804	4.827	4.850	4.873	4.896	4.919

Fig. 25. Titolo dell'inclinazione della tensione di vapore di saturazione rispetto alla costante psicrometrica in termini di °C Celsius e decimi.

2.2. Il bilancio idrico

2.2.1. METODOLOGIA

I dati dell'evapotraspirazione media mensile su 10 anni sono stati paragonati ai dati della pluviometria media mensile su 30 anni onde poter stabilire come mediamente si distribuisca l'acqua proveniente dalle precipitazioni. Il paragone ha fornito i seguenti parametri di disponibilità idrica:

- A. *Deficit idrico* (DI), o eccesso di evapotraspirazione rispetto alle precipitazioni.
- B. *Surplus idrico* (SI), o eccesso di precipitazioni rispetto all'evapotraspirazione.
- C. *Perdite di evaporazione* (PE), o la quantità di pioggia caduta prematuramente nella stagione piovosa su terreni relativamente secchi, e che ritorna nell'atmosfera senza avere circolato nelle colture; si tratta in sostanza di pioggia caduta prima dell'inizio del 'periodo umido' (come definito più avanti); la media mensile delle perdite per evaporazione è stata calcolata addizionando stime per periodi più brevi del mese ottenuti mediante interpolazione grafica.
- D. *Assorbimento del suolo* (AS), o quantità d'acqua che penetra nel suolo per depositarvi.
- E. *Capienza del suolo* (CS), o quantità massima di acqua depositabile nel suolo fino a saturazione; si è ritenuto che la quantità massima di acqua che può immagazzinarsi nel suolo sia di 100 mm, con la riserva peraltro che tale capacità di deposito varia a seconda della struttura e della composizione dei terreni, per cui può calcolarsi con maggiore esattezza in un caso specifico solo in base ad analisi pedologica locale.

F. *Perdite per ruscellamento* (PR), o quantità d'acqua eccedente, rimasta dopo saturazione del suolo; questo calcolo comprende l'infiltrazione in profondità circa il volume della quale non si sono fatte ipotesi.

G. *Precipitazione efficace* (PE), o il totale dell'acqua di pioggia meno le perdite per evaporazione e ruscellamento, in sostanza la quantità media di acqua resa disponibile per circolare nelle colture.

Le medie annuali e mensili di questi parametri sono state riunite in una tabella per ciascuna delle 35 stazioni. A titolo di esempio riportiamo qui la tabella di Maradi (Niger) che si trova sul margine inferiore del Sahel (Fig. 26).

Water Budget		MARADI Niger										Prep 54		Moist 100		M+S=123		Coefficients
	E _T r=25	P	Water deficit	Evap	Water surplus	Ground charge	Ground storage	Run off	Effect rainfall	B of P	B of M	B of H	E of H	E of M	E of S			
January	117	0	117														$\frac{P}{M} = 5.4$	
February	112	0	112														$\frac{EP}{M} = 4.3$	
March	153	0	153														$\frac{P}{E_T} = .38$	
April	167	4	163	4						30th							$\frac{WS}{P} = 25$	
May	187	32	155	32													$\frac{EP}{P} = .81$	
June	176	60	116	30					30		22nd						$\frac{RO}{P} = .09$	
July	144	164			20	20	20		144			11th					Thornthwaite/Penman index	
August	121	260			139	80	100	59	121								HU +.09 + 09	
September	131	110	21			-21	79		131				10th	27th			AR -.71 - 43	
October	134	12	122			-79	0		91						20th		Moisture - 34	
November	115	0	115															
December	107	0	107															
Year	1674	642	1181	66	159			59	517									

Fig. 26. Bilancio idrico mensile e annuale di Maradi (Niger). ET è l'evapotraspirazione potenziale e P le precipitazioni; questi valori sono dati in mm. La lunghezza dei periodi di disponibilità d'acqua è data in giorni; i numeri nelle colonne corrispondenti ai periodi indicano i giorni del mese dell'inizio e della fine di questi periodi.

Abbreviazioni per le colonne: ET = evapotraspirazione potenziale; r = riflettività in superficie della radiazione solare; P = precipitazioni; deficit idrico; evaporazione; surplus idrico; capienza del suolo; ruscellamento; precipitazione efficace; inizio periodo preparatorio; inizio periodo pre-umido; inizio periodo umido; fine periodo umido; fine periodo post-umido; fine periodo post-umido + riserva d'acqua nel suolo.

Colonna coefficienti: precipitazioni / giorni stagione umida; precipitazione efficace / giorni stagione umida; precipitazioni / evapotraspirazione; surplus idrico / precipitazioni; precipitazione efficace / precipitazioni; ruscellamento / precipitazioni. Indice di Thornthwaite e Penman: HU = surplus idrico / evapotraspirazione potenziale; AR = deficit idrico / evapotraspirazione potenziale; questi valori sono moltiplicati rispettivamente per 100 e per 60 e poi addizionati per ottenere l'indice del periodo umido.

2.2.2. PERIODI DI DISPONIBILITÀ IDRICA

Utilizzando l'interpolazione grafica delle medie mensili delle precipitazioni (P) e dell'evapotraspirazione potenziale (ET), unitamente ad altre linee per valori corrispondenti alla metà dell'evapotraspirazione potenziale ($ET/2$) e al decimo della medesima ($ET/10$), si è calcolato il numero dei giorni nei quali le precipitazioni eguagliano o eccedono rispettivamente ET , $ET/2$ ed $ET/10$. In questo modo è stato possibile distinguere nella stagione delle piogge 3 periodi principali:

- a. *Periodo pre-umido*: è quello in cui le precipitazioni sono globalmente inferiori all'evapotraspirazione potenziale (ET); nel caso di una vegetazione permanente che occupa il suolo, l'evapotraspirazione potenziale eguaglia quella reale ($ET = ER$); alla fine di questo periodo, se la coltura ricopre il terreno (il che generalmente con le colture annuali non avviene) il bilancio idrico può essere considerato nullo (nel diagramma che segue è il tratto A_1-B_1). All'interno di questo periodo si possono ulteriormente distinguere a certi fini:

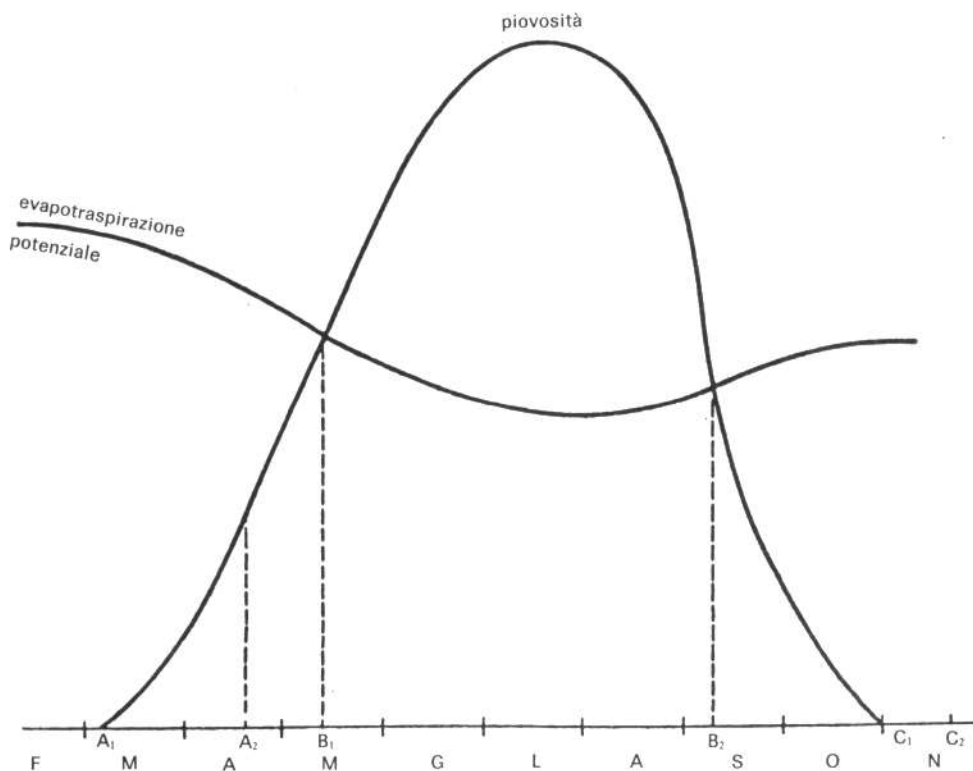


Fig. 27. A_1 : inizio delle piogge; A_2 : inizio del 'periodo intermedio', data alla quale le precipitazioni sono uguali alla metà dell'evapotraspirazione potenziale; B_1 : fine del 'periodo intermedio' e inizio del 'periodo umido'; B_2 : fine del 'periodo umido'; C_1 : fine delle piogge; C_2 : esaurimento delle riserve d'acqua del suolo.

PLACE	P	Date						Number of days						
		B of Pr	B of M	B of H	E of H	E of M	E of M+S	Pr	I ₁	H	I ₂	M	S	M+S
N'Guigmi	235	20.VI	23.VII	-	-	3.IX	3.IX	33	-	0	-	42	-	{32}
Cao Louis	346	21.VI	22.VII	7.VIII	25.VIII	28.IX	25.VII	31	16	18	34	28	4	{32}
Taboua	406	26.V	6.VI	18.VII	4.IX	8.IX	8.IX	41	10	0	1	94	1	(64)
Abeche	503	14.VI	20.VI	13.VII	9.IX	15.IX	16.IX	52	13	48	10	93	1	94
Matam	523	18.VI	23.VI	16.VII	14.IX	20.IX	16.IX	50	16	49	11	93	1	100
Mopti	538	13.VI	3.VII	23.VII	20.IX	26.IX	29.IX	54	16	57	10	92	1	102
Dakar Yoff	578	15.VI	9.VII	16.VII	20.IX	27.IX	29.IX	54	16	57	10	92	1	102
Birni N'Konni	600	4.V	23.VI	19.VII	8.IX	23.IX	22.IX	50	26	51	15	92	23	116
Niamey	608	28.V	20.VI	10.VII	16.IX	24.IX	20.IX	53	30	50	17	95	23	118
Maradi	638	30.V	22.VI	11.VII	18.IX	27.IX	26.IX	53	31	50	17	95	23	118
Fort Lamy	648	3.V	20.VI	10.VII	10.IX	26.IX	17.IX	50	30	50	17	94	23	118
Maiduguri	659	3.VI	17.VI	13.VII	11.IX	26.IX	20.IX	54	31	50	17	94	23	118
Hies	724	15.V	13.VI	18.VII	17.IX	30.IX	20.IX	59	39	77	13	109	20	129
Segou														
Kayes	821	15.V	11.VI	28.VI	21.IX	11.X	1.XI	57	32	89	20	122	21	143
Mongo	858	18.IV	16.VI	28.VI	21.IX	11.X	1.XI	57	32	89	20	122	21	143
Bamako	1099	19.IV	26.V	17.VI	2.X	14.X	6.XI	37	22	107	12	141	23	164

Fig. 28. A sinistra date medie dell'inizio e della fine dei periodi di disponibilità idrica. Le stazioni sono elencate in ordine di maggiore pluviometria (P in mm). Seguono le colonne dell'inizio dei periodi preparatorio, pre-umido, umido, della fine dei periodi umido, post-umido e post-umido + riserva. A destra numero medio dei giorni per ciascuno dei periodi, I₁ e I₂ indicano i periodi intermedi pre-umido e post-umido; M indica il numero dei giorni che si possono aggiungere per tener conto delle riserve. Dove non vi è periodo umido M+S è tra parentesi.

- *Periodo preparatorio*: è quello che inizia con la prima pioggia e in cui le precipitazioni restano inferiori alla metà dell'evapotraspirazione potenziale ($ET/2$), in sostanza il periodo che corre fra $ET/10$ ed $ET/2$ (nel diagramma il tratto A_1-A_2);
 - *Periodo intermedio pre-umido*: di transizione al periodo umido, quello in cui le precipitazioni eguagliano o eccedono $ET/2$ (nel diagramma il tratto A_2-B_1);
 - Tenendo conto dell'acqua immagazzinata nel terreno si può configurare anche un valore 'periodo pre-umido + riserva'.
- b. *Periodo umido*: è quello durante il quale le precipitazioni sono globalmente superiori all'evapotraspirazione potenziale; in prima approssimazione allora ET rappresenta il valore dell'evapotraspirazione reale (E_R) di una data coltura ricoprente il suolo; alla fine di questo periodo, che si estende nel tratto compreso fra le due intersezioni delle curve di P ed ET , il bilancio idrico è positivo (nel diagramma il tratto B_1-B_2).
- c. *Periodo post-umido*: è quello in cui le precipitazioni tornano ad essere inferiori all'evapotraspirazione potenziale, e che va dalla seconda intersecazione delle curve (ove $P = E_R = E_T$) fino al punto in cui l'evapotraspirazione reale si annulla essendosi esaurite le riserve idriche disponibili per la coltura (nel diagramma il tratto B_2-C_2). All'interno di questo periodo si possono ulteriormente distinguere a certi fini:
- *Periodo intermedio post-umido*: di transizione al periodo post-umido, in cui le precipitazioni sono ritornate inferiori all'evapotraspirazione potenziale e che va fino alla fine delle piogge (nel diagramma il tratto B_2-C_1);
 - *Periodo terminale*: quello che va dalla fine delle piogge all'esaurimento delle riserve d'acqua nel suolo (nel diagramma il tratto C_1-C_2); il punto C_2 dipenderà essenzialmente dal tipo di coltura; l'evapotraspirazione reale in questo periodo sarà funzione della quantità d'acqua nel suolo e del suo potenziale efficace, ossia delle riserve costituite durante il periodo umido e delle piogge di fine stagione; anche qui si può configurare un valore 'periodo post-umido + riserve' (Figg. 27, 28).

2.2.3. ALTRE RELAZIONI E INDICI

Si sono prese in considerazione anche altre relazioni e indici quali i seguenti:

- P/PU = precipitazione annuale divisa per il numero di giorni del periodo umido
- PE/PU = precipitazione efficace media giornaliera durante il periodo umido
- SI/P = surplus idrico diviso per le precipitazioni
- RU/P = perdite di ruscellamento divise per le precipitazioni
- PE/P = precipitazione efficace divisa per le precipitazioni.

Queste ultime relazioni possono essere considerate come un indice della precipitazione efficace (PE).

Utilizzando la formula di evapotraspirazione di Penman si è potuto anche calcolare l'indice di aridità di Thornthwaite, a formula $60 DI - 100 SI$, dove $DI = \frac{\text{deficit}}{ET}$

idrico e DI = surplus idrico.

Diamo qui di seguito i valori di questi diversi parametri per le 18 stazioni saheliene (Fig. 29).

	Pot. Transp. ($E_T=0.25$) E_T mm	Rain- fall mm	Water Defi- cit WD mm	Evap. Loss EL mm	Water Sur- plus WS mm	Rup- off RO mm	Effect. rain- fall EP mm	Moist plus storage M+S Days	P M+S	EP M+S	P E_T	WS P	EP P	RO P	Mois- ture Index Th
N'Guigmi	1808	235	1573	42	0	0	193	(42)	5.6	4.6	0.13	-	0.73	-	- 52
Gao	2255	261	1994	151	0	0	110	(25)	10.4	4.4	0.12	-	0.42	-	- 53
St. Louis	1686	346	1361	88	21	0	258	72	4.8	3.6	0.21	0.06	0.74	-	- 48
Tahoua	2307	406	1901	112	0	0	294	(64)	6.3	4.6	0.18	-	0.72	-	- 49
Abéché	1927	505	1535	51	113	13	441	94	5.4	4.6	0.26	0.22	0.86	0.03	- 42
Matam	1619	535	1150	90	66	0	445	110	4.9	4.1	0.33	0.12	0.83	-	- 39
Mopti	1984	552	1488	49	56	0	503	105	5.3	4.8	0.28	0.10	0.87	-	- 42
Zinder	1924	548	1480	62	104	4	482	100	5.5	4.8	0.28	0.19	0.88	0.01	- 41
Dakar Yoff	1825	578	1375	51	128	28	499	112	5.2	4.5	0.32	0.22	0.83	0.05	- 38
Birni N'Komni	1875	600	1376	71	101	1	528	121	5.0	4.4	0.32	0.17	0.88	-	- 39
Niamey	2057	638	1519	93	100	0	545	118	5.4	4.6	0.31	0.16	0.85	-	- 39
Maradi	1674	642	1191	66	159	59	517	120	5.4	4.3	0.38	0.25	0.81	0.09	- 34
Fort Lamy	1958	648	1470	78	160	60	510	120	5.4	4.3	0.33	0.25	0.79	0.09	- 37
Maiduguri	1910	659	1410	62	159	59	538	122	5.4	4.4	0.35	0.24	0.81	0.07	- 36
Thies	1726	694	1276	33	244	144	517	130	5.3	4.0	0.40	0.35	0.74	0.21	- 30
Segou	1823	724	1277	57	178	-78	589	129	5.6	4.6	0.40	0.25	0.81	0.11	- 33
Mongo	1491	858	1000	75	367	267	516	135	6.4	3.8	0.57	0.43	0.60	0.31	- 15
Bamako	1804	1099	1156	49	451	351	699	164	6.7	4.3	0.61	0.41	0.64	0.32	- 13

Fig. 29. Parametri e coefficienti del bilancio idrico annuale medi delle 18 stazioni elencate in ordine di maggiore pluviometria. Tutti i valori elencati a sinistra sono in mm di acqua. I valori WD (deficit idrico), WS (surplus idrico), EL (perdite di evaporação), RO (perdite di ruscellamento), EP (precipitazioni efficaci) sono calcolati su base mensile. Fra i coefficienti figurati a destra, si nota che P/M+S (precipitazioni divise per il periodo post-umido+riserva) e EP/M+S (precipitazioni divise per il periodo post-umido+riserva) sono abbastanza costanti. EP/P (precipitazioni efficaci divise per precipitazioni, l'indice dell'efficacia, è più alto intorno alla pluviometria annuale media dei 600 mm, ossia al margine S del Sabel. L'indice di umidità è derivato dalla formula di Thornthwaite, ma usando i valori E_T ottenuti, con metodo di Penman.

2.3. Aspetti agronomici del bilancio idrico

2.3.1. SIGNIFICATO E CAMPO DI APPLICAZIONE DEI PARAMETRI E INDICI DATI

L'agroclimatologia è « lo studio delle reazioni delle colture all'ambiente climatico » al fine di delimitarne le aree di adattamento in termini di produttività. L'ambiente climatico ha due componenti: a) il clima atmosferico (propriamente detto); b) il clima edafico (o clima del suolo). Quest'ultimo dipende a sua volta: a) dal clima atmosferico; b) dalle caratteristiche fisiche del suolo (pedologia, orografia, ecc.). Il calcolo del bilancio idrico di una 'regione agroclimatica' ci può solo dare un bilancio idrico *teorico*: per arrivare al bilancio *reale*, si dovrà scendere alla dimensione dei 'distretti agroclimatici', ossia ad ambienti climatici qualificati principalmente in base alla struttura fisica, a quadri meteorologici di breve periodo, ai bisogni specifici di ogni singola coltura.

Il problema che si pone è di tirare il massimo vantaggio possibile dalle disponibilità d'acqua. A questo proposito, se consideriamo unicamente le colture secche (dato che in quelle irrigue una certa misura di manovra idrica è sempre possibile), vediamo che i bisogni sono determinati dalla radiazione netta e dal potere evaporante dell'aria, i cui valori istantanei hanno sulle rese un'incidenza considerevole; tuttavia il consumo globale d'acqua di una coltura è anzitutto determinato dal periodo di tempo durante il quale questa occupa il suolo, tempo che è funzione della specie, della varietà, della data della semina, del fotoperiodo (se la coltura è fotoperiodica), della somma delle temperature (temperatura cumulata). In realtà la durata della stagione umida, e la sua posizione nell'anno, hanno più importanza, sia della ripartizione delle disponibilità idriche, sia e soprattutto della quantità totale di acqua ricevuta durante la stagione delle piogge. Il problema è allora essenzialmente quello di adattare e regolare i cicli vegetativi. I termini di questo adattamento devono essere considerati su una scala più o meno di dettaglio a seconda dell'obiettivo.

- A. Nei limiti del *distretto agroclimatico* la scala sarà quella del bilancio idrico *reale*, che dovrà tener conto: a) delle caratteristiche locali (o mesoclimatiche) di piovosità e di evapotraspirazione su periodi come la settimana o la decade, quelli appunto che interessano direttamente le colture; b) delle caratteristiche idriche dei suoli, compresi la profondità e i rilievi, al fine di modulare il bilancio idrico quanto più possibile in funzione del potenziale efficace di acqua nel suolo (determinato a sua volta dal tasso di umidità, dall'intensità di E_T , dal volume del suolo stesso e dalla sua conduttività per l'acqua); c) dal ciclo vegetativo della coltura in tutte le sue fasi note (avvenimenti fenologici).
- B. Nei limiti della *regione agroclimatica* (tipo di clima iperarido, arido, semiarido, ecc. che consente colture di intensività determinata su zone climatiche diverse) la scala sarà quella del bilancio idrico *teorico*, che non terrà conto delle caratteristiche pedologiche, che sarà elaborato su periodi dell'ordine del mese a partire dai valori climatici di P e E_T , in sostanza le medie dei valori locali; parallelamente le caratteristiche vegetative delle colture saranno considerate solo nei loro avvenimenti fenologici basilari (semina, fase vegetativa, fioritura, fruttificazione), e la ripartizione della stagione umida sarà quella fondata sui fatti climatici generali.

A questo proposito possono essere utili alcune ulteriori precisazioni:

- *Deficit idrico.* È la quantità d'acqua che dovrebbe essere aggiunta annualmente in una località determinata per assicurare una produzione alimentare continua (in realtà il quantitativo massimo, perché ogni eccedenza sarebbe sprecata). Questo deficit esiste in tutto il Sahel, come del resto nella zona sudanese sottostante. Esso è in realtà maggiore se considerato mese per mese, come abbiamo fatto qui, perché durante il periodo umido vi è una eccedenza che va ad aumentare i valori annuali. Nei periodi inferiori al mese il deficit può essere ancora maggiore, specie se si considera il bilancio idrico giornaliero. Si potrebbero calcolare i valori massimi di questo deficit a patto di tener conto, sia della intensità effettivamente rilevata delle precipitazioni, dalla quale si dovrà detrarre la misura del ruscellamento massimo, sia della topografia e della permeabilità dei terreni. Su scala mensile il deficit idrico oscilla dai 1500 mm nel nord (Sahel) ai 900 mm nel sud (zona sudanese), anche se qui la differenza fra pluviometria annuale ed evapotraspirazione possa essere di soli 300 mm.
- *Surplus idrico.* Anche se su base annuale la pluviometria non supera in nessun luogo l'evapotraspirazione, un surplus idrico esiste ovunque su base mensile. Infatti la sua assenza coincide col limite N del Sahel, mentre da questo limite andando verso S può oscillare fra zero e 550 mm (zona sudanese compresa). Il significato agronomico di questo surplus idrico è legato al ruscellamento. Diamo qui di seguito la distribuzione spaziale di questi due valori (Fig. 30).

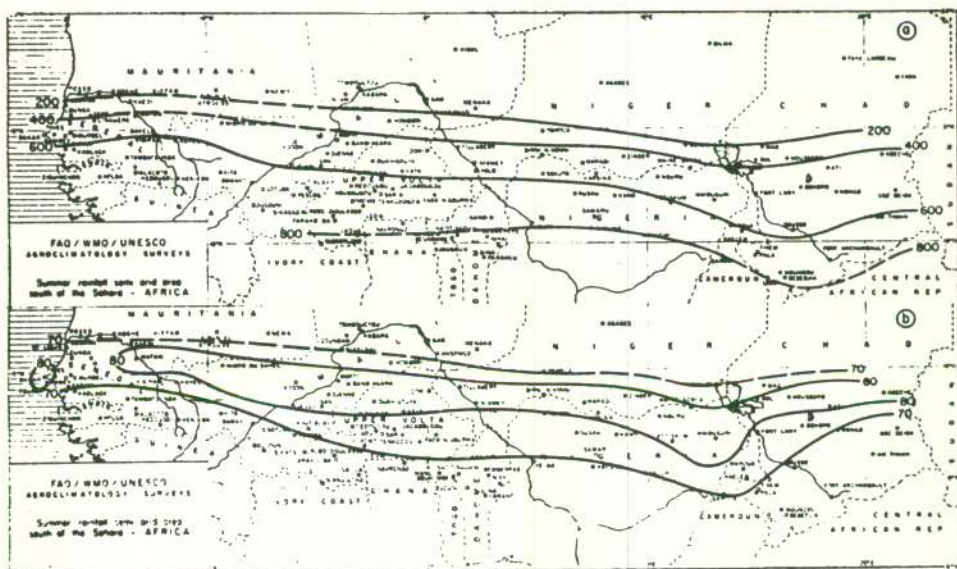


Fig. 30. Surplus idrico annuale (a), e ruscellamento (b) calcolati su base mensile (WMO - No 210.TP.110).

- *Ruscellamento.* Nelle colture secche il ruscellamento può essere considerato una perdita idrica netta, in quanto va in detrazione dalle precipitazioni efficaci. D'altra parte può avere benefici effetti nel caso del Sahel, dove le scarse precipitazioni si accumulano in piccoli bacini imbriferi e in conche endoreiche, o dove in presenza di terreni profondi e di colture a lungo sistema radicale diventano possibili pascoli

perenni. Dai calcoli fatti in questa analisi, e supponendo un deposito d'acqua nel suolo di 100 mm, il ruscellamento si verifica quando la pluviometria media annuale supera i 500 mm. Collegato ai massimi pluviometrici del mese di agosto, esso aumenta progressivamente da zero a 450 mm ai limiti S della zona sudanese, mentre la sua proporzione rispetto alle precipitazioni aumenta da zero a 0,35. Ciò è tuttavia sufficiente a permettere colture continue a un tasso di evapotraspirazione accettabile ben distribuito durante l'anno. Il ruscellamento dipende essenzialmente dall'intensità delle precipitazioni in brevi intervalli: quando queste eccedono il tasso di assorbimento del suolo (che è in genere 2 volte l'intensità pluviometrica), esso si produce anche prima che il terreno sia saturato, per cui i valori qui calcolati devono ritenersi dei minimi. Le perdite di evaporazione nelle regioni considerate variano da 25 a 90 mm, essendo più alte nel Sahel dove le precipitazioni sono minori. Diamo qui di seguito la distribuzione spaziale delle precipitazioni efficaci e l'indice di efficacia pluviometrica (Fig. 31).

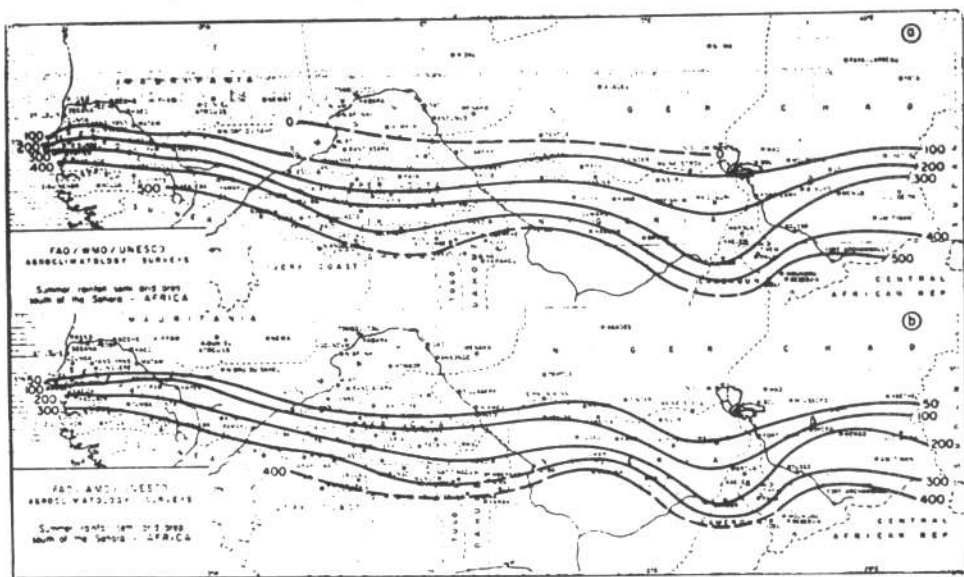


Fig. 31. a) Precipitazioni efficaci annuali in mm calcolate su base mensile; b) indice dell'efficacia delle precipitazioni (EP/P). (WMO - No 210.TP.110).

Le precipitazioni efficaci possono essere riguardate come una evapotraspirazione cumulata; sono più prossime ai valori dell'evapotraspirazione reale che la somma dell'evapotraspirazione potenziale accumulata durante il periodo delle colture. La media giornaliera di precipitazioni efficaci durante il periodo umido è abbastanza costante in tutta l'area considerata, non scostandosi sensibilmente dai 4 mm, il che assicura una disponibilità idrica abbastanza regolare nonostante le importanti variazioni che possono intervenire nella lunghezza del periodo; ciò è appunto dovuto a questi livelli più alti di evapotraspirazione potenziale in questo periodo in conseguenza delle piogge: la relazione PE/P varia da 0,20 a 0,80 procedendo da N a S. Durante il periodo umido l'evapotraspirazione reale da una coltura densa, l'evapo-

traspirazione potenziale e le precipitazioni efficaci saranno eguali ($E_R = E_T = PE$). Nel periodo pre-umido l'acqua di pioggia è in pratica interamente assorbita dalla coltura, se questa è a ciclo vegetativo rapido e ben curata. Si potrebbe dire che anche le precipitazioni del periodo post-umido, se aggiunte ai quantitativi immagazzinati nel suolo, si avvicinano al consumo reale di questo periodo e quindi alle precipitazioni efficaci.

La distribuzione delle precipitazioni efficaci (PE) nell'area considerata aumenta progressivamente da N a S, ma non in proporzione con le precipitazioni totali (P), essendo relativamente più alta dove queste sono meglio ripartite e non vi sono eccessi nel mese di agosto: essa è di 200 mm al margine N del Sahel e di 800 mm al margine S della zona sudanese. È interessante notare che l'indice di efficacia pluviometrica è più alto (80%) lungo il margine S del Sahel sull'isoietta dei 600 mm; mentre nella parte N è ridotto dalle perdite di evaporazione, nella parte S lo è dall'eccesso di precipitazioni.

Quanto alle altre relazioni:

- P/E_T (precipitazioni divise per l'evapotraspirazione potenziale) varia da 0,2 nel N a 0,8 nel S;
- P/U (precipitazioni divise per i giorni del periodo umido) è abbastanza costante in tutta l'area intorno al livello dei 5,5 mm, il che permette di calcolare facilmente la durata del periodo umido partendo dalla media pluviometrica annuale, parametro meglio conosciuto;
- PE/U (precipitazioni efficaci divise per i giorni del periodo umido) è leggermente più variabile di P/U , dato che PE/p varia di per sé ma senza allontanarsi molto dai 4 mm giornalieri.

2.3.2. SIGNIFICATO AGRONOMICO DEI PERIODI DI DISPONIBILITÀ IDRICA

I periodi di disponibilità idrica sono senza dubbio i parametri del bilancio idrico di maggiore interesse agronomico (Fig. 28).

- Il periodo pre-umido corrispondente in pratica all'epoca delle semine (Fig. 27). Da notare in questo periodo il punto A_2 quando l'evapotraspirazione reale (ossia in linea generale le precipitazioni) è uguale a 1/2 dell'evapotraspirazione potenziale di Penman (E_T) per un albedo di 0,25, oppure a 1/3 dell'evapotraspirazione potenziale di Penman (E_0) per un albedo di 0,05. Tale valore corrisponde all'evaporazione reale media di un terreno nudo o ricoperto di vegetazione molto rada quando è irrorato irregolarmente dalla pioggia. A partire da questo momento le semine saranno possibili con sempre meno rischi. Per semine effettuate al momento A_2 l'evapotraspirazione reale aumenterà in modo esponenziale fino alla completa copertura del terreno da parte della coltura. Le possibilità per una coltura di ricoprire il terreno al momento B_1 , come sarebbe augurabile, dipenderanno dalla specie, dalla varietà, dalla densità della piantagione, dal tempo che separa A_2 e B_1 per un dato grado di fertilità. Al contrario la prima parte del periodo A_1-A_2 sarà quella delle semine 'a secco', il sistema più aleatorio, unicamente possibile per colture aventi una forte capacità di resistenza alla siccità, come il miglio (*Pennisetum typhoides*); sarà anche, in regioni a bassa pluviometria, l'epoca delle semine di colture marginali dove la durata del ciclo impone di aumentare al massimo il tempo di vegetazione. Il rischio di dover ripetere le semine è qui compensato dalla pro-

bilità di un raccolto migliore, specie se si tratti di bassi quantitativi di sementi (10-20 kg/ha, come per il miglio, il sorgo o il cotone). Il periodo A_T-B_1 è dunque, come si è visto, un periodo intermedio, come l'altro che si avrà fra B_2 e il momento in cui le precipitazioni ridiventano uguali a $E_T/2$, ma il significato agronomico è qui minore in quanto una parte dell'evapotraspirazione potenziale è assicurata dalle riserve d'acqua del suolo. La durata del periodo pre-umido varia considerevolmente in queste regioni con una variabilità che non è né zonale né regolare (Fig. 32).

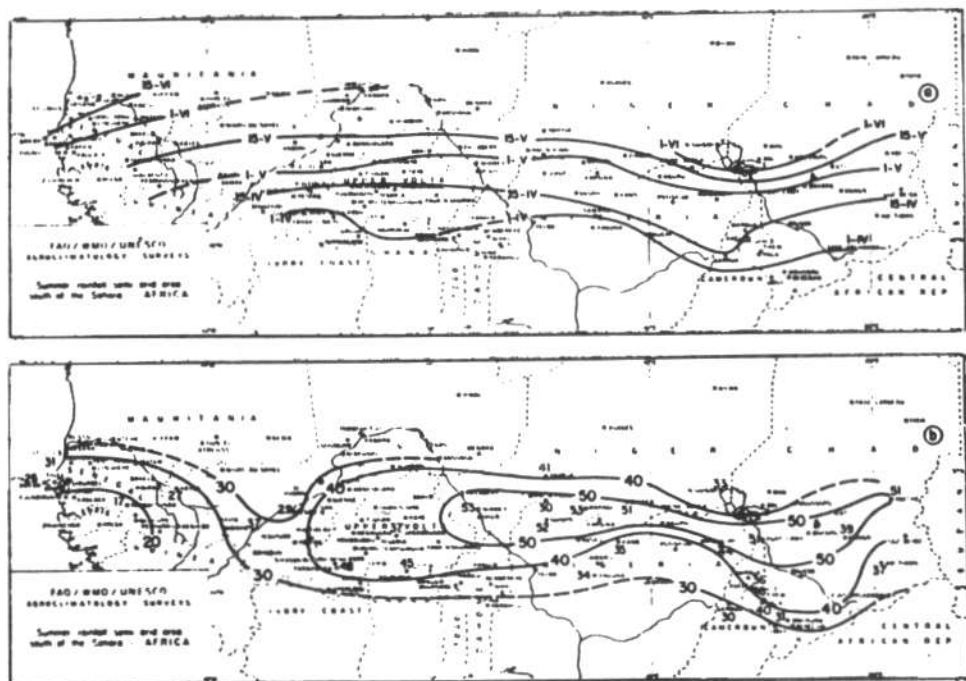


Fig. 32. a) Isocroni delle date medie di inizio del periodo; b) durata media in giorni (WMO-No 210.TP.110).

Può durare da più di 50 giorni a meno di 20, i periodi più lunghi trovandosi intorno all'isoieta dei 600 mm al centro della parte E dell'area (margine S del Sahel nigerino e ciadiano). La durata del periodo diminuisce progredendo verso N per la minor durata della stagione piovosa, e verso S dove le più frequenti piogge conducono rapidamente oltre il punto $E_T/2$ (metà dell'evapotraspirazione potenziale). L'epoca dell'inizio è distribuita zonalmente ma è ritardata a W (come si vede dalla Fig. 41). Diamo comunque gli isocroni del principio e della fine del periodo (Fig. 33). I periodi intermedi sono mediamente piuttosto costanti ovunque: 25 giorni nel pre-umido e 15 nel post-umido; sono tuttavia i periodi dove le precipitazioni sono più variabili e critiche, per lo sviluppo vegetativo nel primo caso, per la maturazione dei frutti nel secondo.

- Nel *periodo umido* i bisogni di acqua delle colture, allora in stato di vegetazione attiva, possono essere assicurati in modo ottimale ($E_R = E_T$), sennonché non sarà

sempre così se interverrà il ruscellamento; il più sovente avverrà che il deficit d'acqua nel suolo sarà semplicemente colmato al livello del sistema radicale con infiltrazione dell'eccedenza.

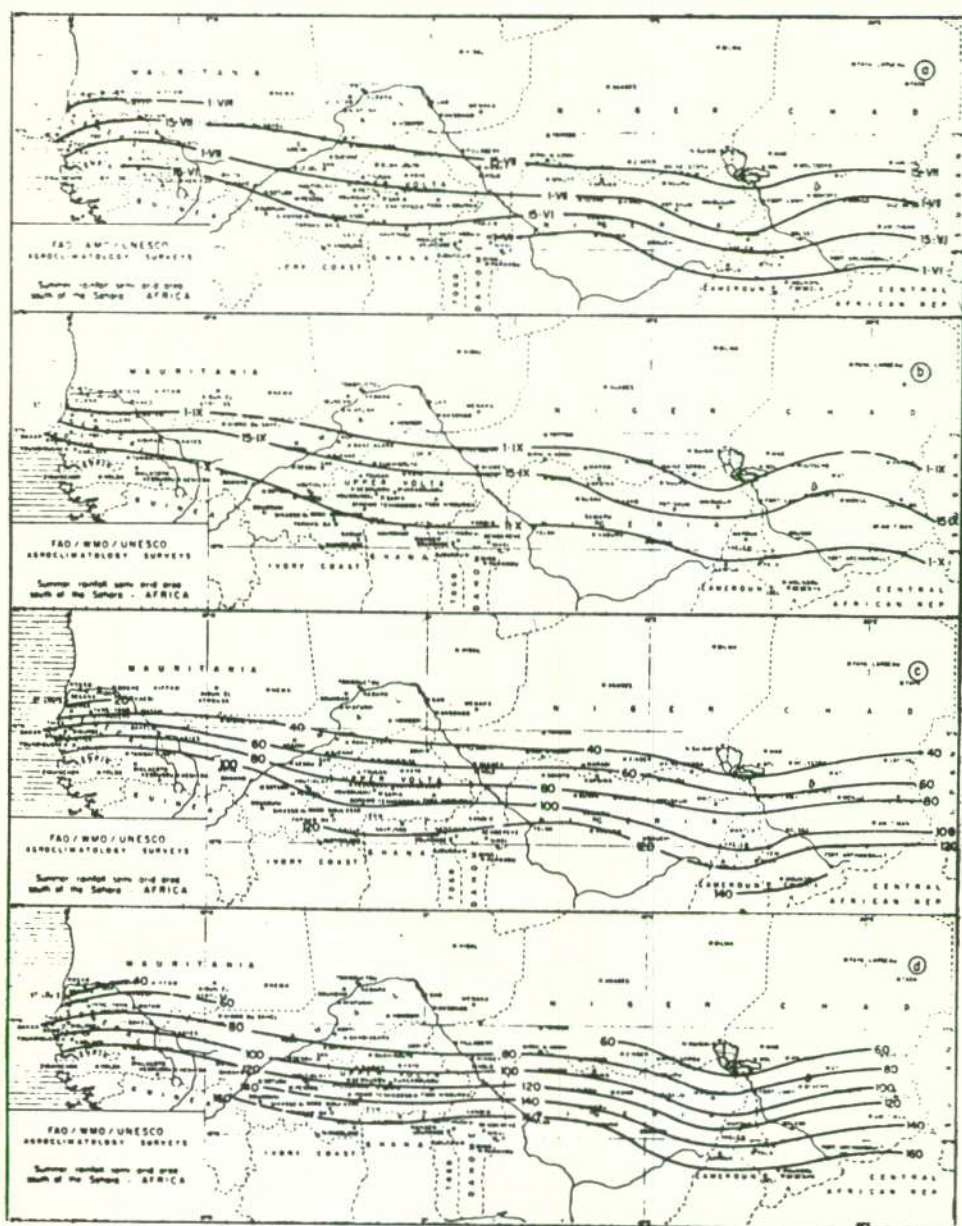


Fig. 33. Periodo umido medio. a) Isocroni dell'inizio; b) Isocroni della fine; c) Durata; d) Durata del primo periodo intermedio più il periodo umido (WMO-No 210. TP.110).

- Il *periodo post-umido*, se questo sarà stato il caso, si aprirà nelle migliori condizioni possibili per le rese. Da questo punto di vista le posizioni rispettive del punto B_2 e della fioritura (o spigatura nelle graminacee) per le diverse colture avrà una funzione molto importante. Questo periodo permetterà a una parte tanto maggiore della fioritura utile di maturare convenientemente, quanto più esso sarà tardivo e sarà breve la fase fecondazione-maturazione dell'elemento fruttifero; ma la fioritura sarà tanto più esposta alle piogge del periodo umido, e quindi alla colatura e alle malattie crittogamiche, quanto più il punto B_2 sarà vicino (al di qua) o lontano (al di là) alla fine della fioritura. Se al periodo umido si addizionano quelli intermedi, abbiamo un lasso di tempo da 40 a 180 giorni; da 55 a 20 se si computano le riserve d'acqua del suolo (Fig. 34). Questo è infatti il parametro climatico più vicino al ciclo vegetativo completo (da seme a seme).

È chiaro che un periodo di siccità delle stesse caratteristiche di tempo ed intensità non avrà lo stesso significato, e gli stessi effetti sulle rese, se si verificherà nei momenti A_1-A_2 , A_2-B_1 o B_1-B_2 . Una precipitazione della stessa altezza non avrà lo stesso valore per la coltura se interverrà nell'una o nell'altra fase.

Finalmente, tutte le altre condizioni dell'ambiente climatico essendo eguali, e tenendo conto solo dei fatti climatici e non di quelli fenologici (salvo forse la data delle semine), la fluttuazione di origine climatica delle rese sarà funzione: a) della durata della vegetazione reale (o fittizia se si prende per le semine il momento A_2) a partire dalla data delle semine in periodo pre-umido fino a quella in cui E_R si annulla (punto C_2); b) della quantità di acqua caduta nel periodo pre-umido, prima o dopo le semine reali o fittizie; c) dell'eccesso di pioggia rispetto all'evapotraspirazione potenziale in periodo umido, eccesso che può costituire riserve utilizzabili in periodo post-umido; d) dell'eccesso di pioggia sull'evapotraspirazione potenziale in periodo umido in relazione al numero di giorni, o di giorni di pioggia, fra B_1 e B_2 , in quanto questo eccesso può significare un possibile ingorgo del suolo con asfissia delle colture; e) della quantità di acqua caduta nel periodo post-umido, in quanto ciò rappresenta un apporto utile in un tempo in cui le disponibilità sono generalmente inferiori ai bisogni a causa del potenziale d'acqua immagazzinato nel suolo.

Come conclusione possiamo dire che in queste regioni il primo adattamento delle colture all'ambiente si realizza cercando di far coincidere il ciclo vegetativo e i suoi principali fenomeni biologici col periodo umido + riserve del suolo e coi suoi principali eventi climatici. Riassumiamo in un diagramma le disponibilità di acqua nelle varie fasi della stagione delle piogge per le 35 stazioni disposte in ordine di grandezza della media pluviometrica annuale. Si noterà la relativa simmetria dei periodi di disponibilità idrica, il valore costante dei periodi intermedi e il progressivo aumento del periodo umido, l'unica anomalia rispetto allo schema essendo quella registrata dalle stazioni dell'estremo W. Da notare infine che 13 stazioni saheliane occupano i primi 13 posti della scala di 35 stazioni, ossia si trovano nelle situazioni più critiche (Fig. 35).

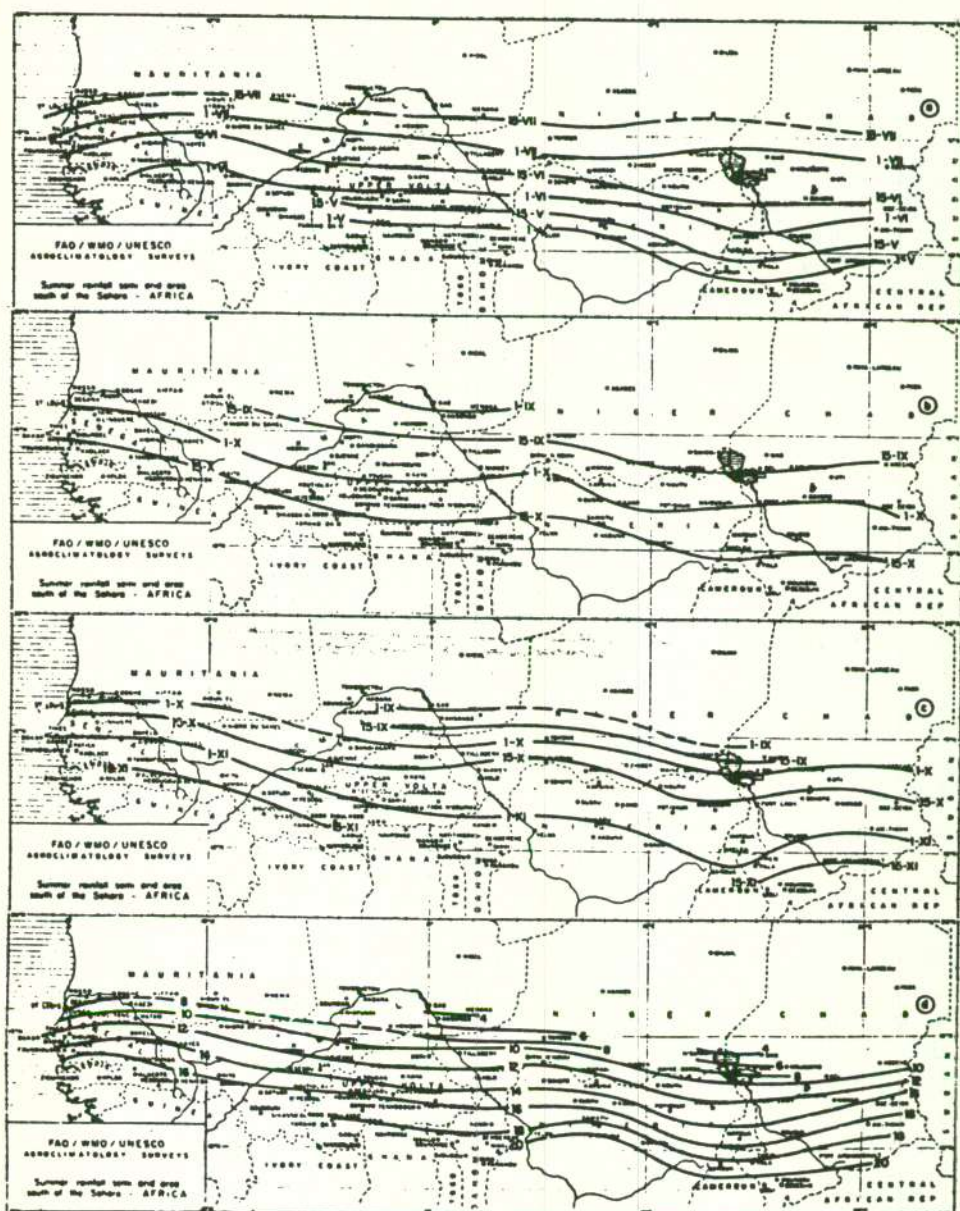


Fig. 34. Periodi pre-umidi e post-umidi medi. a) Isocroni dell'inizio; b) Isocroni della fine; c) Isocroni della fine tenendo conto della riserva del suolo; d) Durata (WMO - No 210.TP.110).

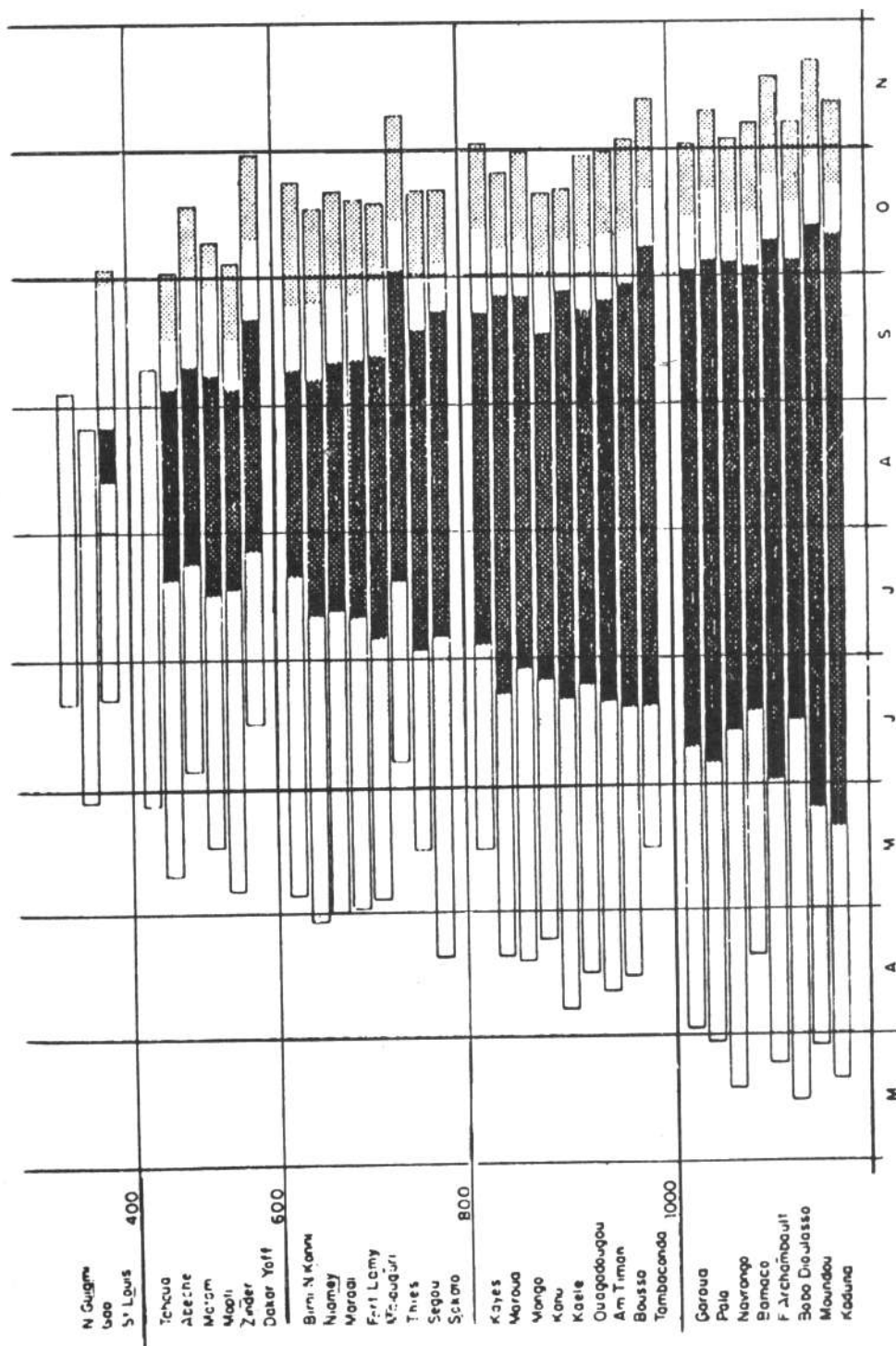


Fig. 35. Diagramma che riassume i periodi di disponibilità idrica nelle regioni considerate. Da sinistra a destra: periodi pre-rattorio, intermedio del pre-umido, umido (in nero), intermedio del post-umido, intermedio più riserve del suolo.

3. Complesso eliotermico

3.1. Radiazione

3.1.1. RADIAZIONE INCIDENTE SOPRA L'ATMOSFERA

La radiazione solare è importante in quanto fonte di diverse forme di energia usate dalle colture per i loro processi metabolici ed eventualmente per la produzione secca. Quello che qui ci interessa è la radiazione globale al livello delle colture, della quale il 2-4% regola la fotosintesi, come pure l'energia netta disponibile per riscaldare il suolo e l'ambiente prossimo e per fare evaporare l'acqua.

kcal cm ⁻²					
Lat. N°	5°	10°	15°	40°	50°
Anno	311,6	307,3	301,9	246,1	213,0
Estate metà anno	160,9	164,9	167,7	164,6	156,0
Inverno metà anno	149,6	142,4	134,2	81,5	57,0

Fig. 36. Radiazione solare sopra l'atmosfera. 40°N può essere considerata la lat. del Mediterraneo e 50°N quella media della zona temperata. Si notino l'uniformità estiva e la differenza invernale.

La radiazione incidente sopra l'atmosfera può essere considerata come l'apporto lordo. Nelle regioni considerate è particolarmente alta con un leggero gradiente da N a S (oltre 300 kcal/cm²); è di 1/6 più alta che nel Mediterraneo (250 kcal/cm²), e di 1/3 più alta che nell'Europa nord-occidentale (200 kcal/cm²); nei 6 mesi comprendenti quelli estivi è circa la stessa in tutte e tre le zone accennate (ossia circa 160 kcal/cm²), con la riserva peraltro che durante le lunghe giornate estive l'Europa nord-occidentale riceve 1/10 di energia in più rispetto all'area saheliana-sudanese; nei mesi invernali per contro le regioni considerate subiscono una riduzione di radiazione del 10-20%, mentre nel Mediterraneo è del 50% e nell'Inghilterra meridionale del 70% (Fig. 36).

3.1.2. RADIAZIONE GLOBALE

La radiazione globale è il totale di energia solare su una superficie orizzontale al livello del suolo, ricevuta in forma diretta o riflessa o diffusa. È quindi il parametro che interessa le colture.

In mancanza di misurazioni della radiazione globale, questa è stata calcolata mediante una formula empirica basata sulla radiazione incidente sopra l'atmosfera e

sulla proporzione fra luce solare osservata e massimi possibili⁴. I livelli così calcolati variano da 160 a 180 kcal/cm², corrispondenti a valori giornalieri approssimativi di 440-500; essi hanno una distribuzione zonale con valori più alti nel N (contrariamente alla radiazione lorda incidente), e ciò a causa della prolungata nebulosità provocata a S dal monsone (Fig. 37).

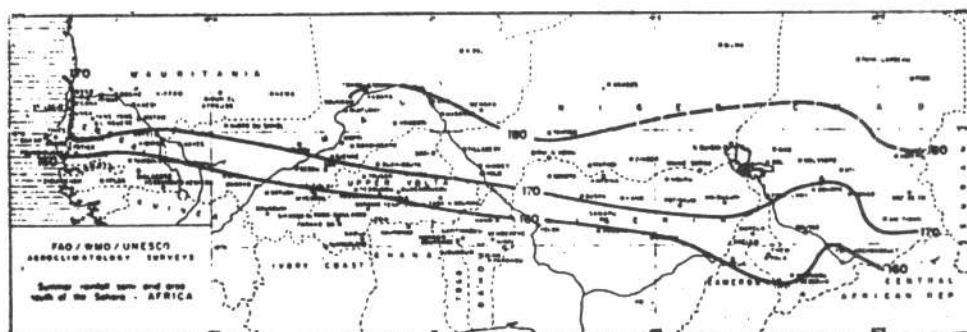


Fig. 37. Radiazione globale media annuale (in kcal/cm²) (WMO - No 210.TP.110).

Le variazioni stagionali sono relativamente ridotte. Analogamente all'evapotraspirazione, la radiazione globale mostra due massimi, prima e dopo le piogge e durante l'inverno. Diamo qui le medie mensili su 10 anni per le stazioni del Sahel (Fig. 38).

3.1.3. RADIAZIONE NETTA

La radiazione netta o bilancio energetico (= radiazione globale — radiazione riflessa dalla terra) è stata calcolata con la medesima formula⁵. Spazialmente si registrano solo variazioni fra 100 e 110 kcal/cm², eccetto che sulla costa del Senegal dove possono arrivare a 120. Vi è un pronunciato gradiente N-S in agosto, al culmine della stagione delle piogge, coi valori più alti a N. Il gradiente si inverte in inverno. Anche la radiazione netta mostra due massimi e due minimi, ma la riduzione durante le piogge è meno evidente, dato che la aumentata nebulosità e umidità a loro volta riducono le perdite di energia riflessa dalla terra verso lo spazio (Figg. 39 e 40). Queste stime tuttavia, quando sono eseguite per calcolare l'energia disponibile per la vegetazione e le colture⁶, rischiano di essere sottovalutate nel Sahel a causa dell'avvezione di aria da zone sottoposte a una radiazione maggiore; il fenomeno è favorito dal surriscaldamento provocato dalla subsidenza anticiclonica

⁴ Si tratta della formula di Brunt: $R_g = RA (0,18 + 0,55 \, n/N)$ dove RA = radiazione incidente; n/N = frazione di luce solare osservata rispetto al totale possibile. È parte della formula di Penman sull'evapotraspirazione. La formula non tiene conto degli effetti riducenti delle litometeore (venti di sabbia o nebbia secca) particolarmente frequenti nel Sahel: la riduzione sarebbe del 6,5% (Henri Masson dell'Università di Dakar).

⁵ $RA (0,18 + 0,55 \, n/N) - \sigma T^4 (0,56 - 0,092 \, v \, e \, d) (0,10 + 0,90 \, n/N)$.

	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
<u>Senegal</u>												
Dakar Yoff	388	453	529	566	536	489	407	395	451	458	438	369
Mtambour	390	423	523	562	530	487	404	393	457	444	437	384
Louis	408	467	562	602	573	508	444	396	442	464	441	383
Thies												
<u>Mali</u>												
Bamako	425	466	506	486	452	449	404	367	426	438	421	381
Gao	438	488	507	549	470	470	410	390	450	444	430	389
Mopti	405	468	496	513	479	450	451	431	478	444	430	391
Segou	453	508	524	521	497	503	466	439		495		
<u>Nigeria</u>												
Maiduguri	438	522	505	511	499	483	422	382	455	516	500	475
<u>Niger</u>												
Birni N'Konni	460	504	506	513	507	513	459	439	487	519	486	438
Maradi	477	514	520	539	523	523	470	439	486	520	480	433
N'Guigmi	457	498	487	503	456	494	463	445	490	503	458	427
Niamey	462	508	497	503	469	504	463	427	490	503	471	433
Tahoua	465	509	497	503	489	504	463	430	496	510	471	432
Zinder	453	489	497	503	489	495	407					
<u>Ciadi</u>												
Abéché	474	519	523	548	525	513	450	412	478	517	456	455
F. Lamy	474	517	496	511	503	462	408	384	454	493	450	453
Mongo	467	512	497	506	507	456	405	357	424	460	457	443

Fig. 38. Radiazione globale media mensile in 18 stazioni in $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{giorno}$.

	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Senegal												
Dakar Yoff	245	303	369	414	407	387	339	336	371	363	307	228
Katam	124	263	362	406	402	376	333	336	363	363	270	200
St. Louis	215	264	348	404	414	390	358	329	363	356	271	202
Thies												
Mali												
Bamako	192	224	278	324	337	356	338	301	243	331	253	188
Gao	193	224	283	323	337	357	338	300	243	331	253	188
Segou	210	246	282	317	349	383	371	355	383	360	268	206
Nigeria												
Maiduguri	239	257	272	313	349	369	339	311	362	358	273	237
Niger												
Birni N'Konni	196	222	264	320	358	385	360	326	285	348	240	185
Maradi	203	236	284	320	358	385	360	326	285	348	240	185
Niamey	197	224	264	320	358	385	360	326	285	348	240	185
Zahua	201	236	280	320	358	385	360	326	285	348	240	185
Zinder												
Ciad												
Abéché	185	217	255	296	327	360	339	330	359	301	210	177
F. Lamy	187	232	280	301	341	349	341	341	351	335	231	189
Mongo	196											

Fig. 39. Radiazione netta media mensile in 18 stazioni in $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{giorno}$.

(nel calcolo dell'evapotraspirazione potenziale invece detto rischio di valutazione è mitigato in parte dall'uso dei termini aerodinamici o di avvezione).

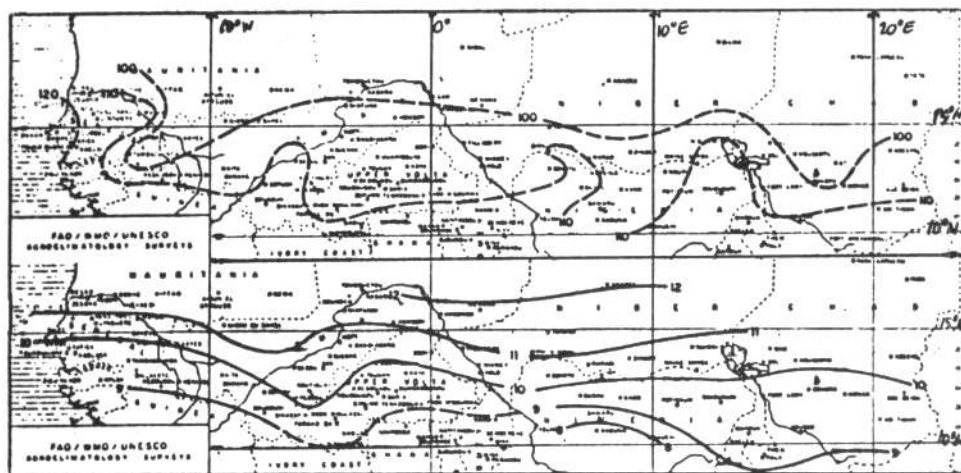


Fig. 40. Radiazione netta in kcal/cm^2 per: a) l'anno, dove si nota la debolezza del gradiente e l'influenza marittima in Senegal; b) il mese di agosto durante le piogge, dove si nota il gradiente S-N (WMO - No 210.TP.110).

Può essere interessante riassumere in un diagramma i tre parametri di radiazione ora esaminati per un punto determinato, per es. Bamako che è di poco oltre il limite S del Sahel (Fig. 41). La radiazione incidente sopra l'atmosfera dipende dalla posizione del sole e Bamako è abbastanza prossima all'equatore per avere un doppio mas-

simo (agli equinozi). La radiazione solare mostra una flessione che è legata al mon-
sone. Ciò si ripercuote anche sulla radiazione netta ma in misura minore, in quanto
la perdita di energia verso lo spazio esterno è ridotta durante la stagione umida dal-
l'assorbimento dell'onda lunga della radiazione terrestre da parte del vapor d'acqua
dell'atmosfera e dell'azione riflettente delle nubi verso terra. La radiazione globale
e la netta tendono di conseguenza a convergere durante le piogge. I valori relativa-

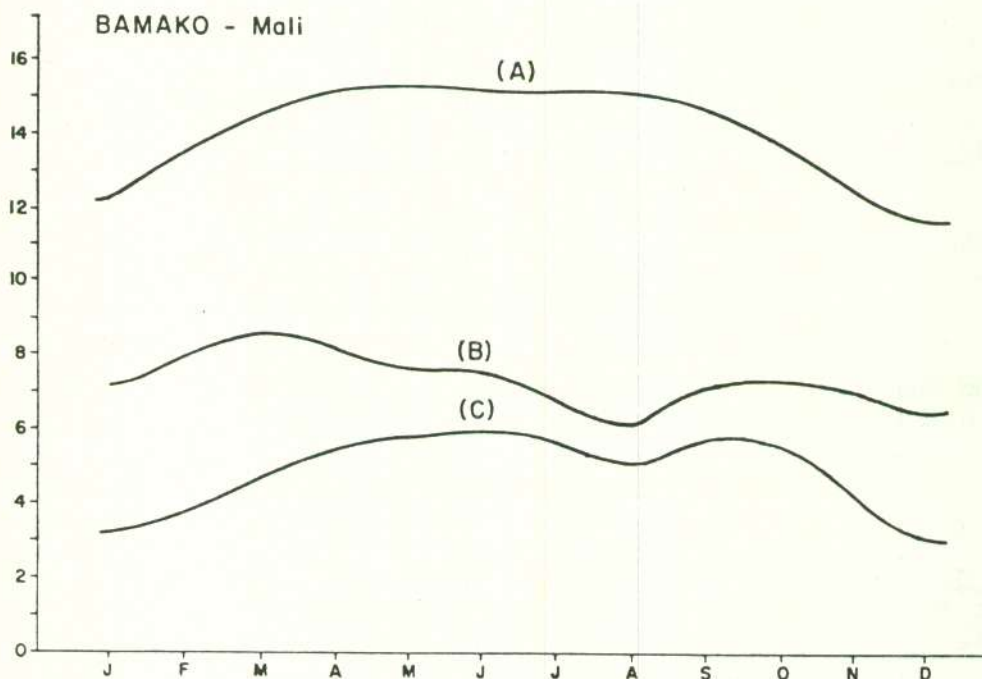


Fig. 41. Variazione stagionale della media mensile di radiazioni espressa in mm di acqua evaporabile: A, radiazione incidente sopra l'atmosfera; B, radiazione globale; C, radiazione netta. Stazione di Bamako.

mente alti della radiazione netta durante la stagione umida non si ripercuotono sulle temperature perché gran parte dell'energia disponibile è spesa nell'evaporazione dell'acqua.

Dal punto di vista agronomico va tenuto presente un elemento importante: il fatto che l'apporto, sia della radiazione globale necessaria alla fotosintesi sia della radiazione netta determinante in gran parte la temperatura e la circolazione dell'acqua, si trovino allo stesso alto livello in tutte le regioni considerate implica che *dovunque l'acqua è disponibile in continuazione, è possibile avere raccolti in qualsiasi momento dell'anno*, il che certamente non è il caso nelle regioni mediterranee e temperate (almeno fuori delle limitate colture in serra).

3.2. Temperature

3.2.1. GENERALITÀ

Le forme di energia solare che determinano la crescita e lo sviluppo delle colture sono le temperature alle quali sono esposte e l'intensità e durata della luce. Le temperature non agiscono solo quantitativamente, ossia per somme di energia calorifica critica necessarie alla crescita e ai vari stadi di sviluppo, ma anche qualitativamente,

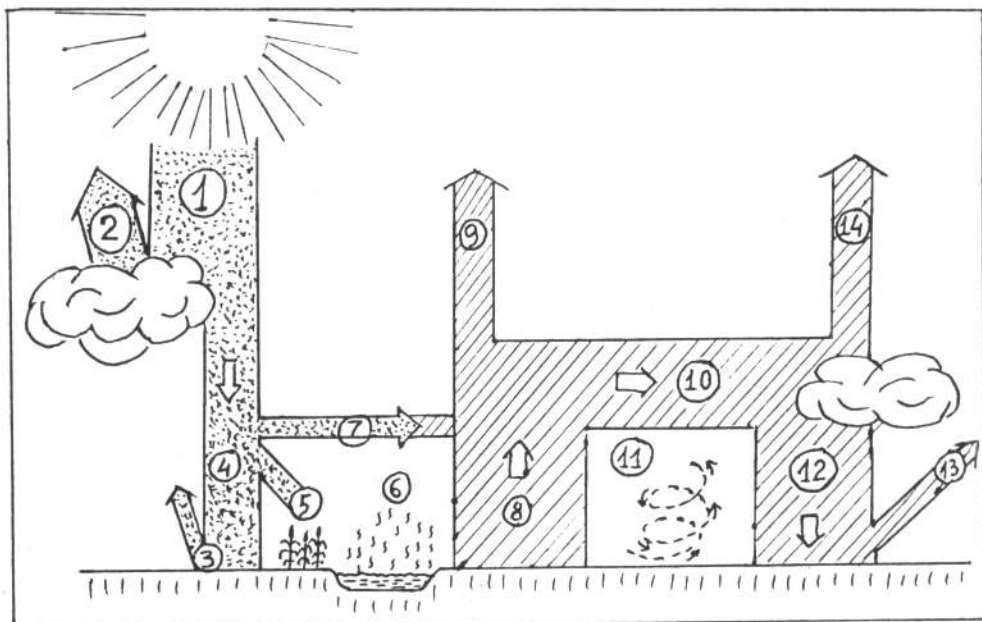


Fig. 42. Movimento dell'energia solare. (1) Radiazione in arrivo; (2) Radiazione riflessa dalle nubi; (3) Radiazione riflessa dalla terra; (4) Radiazione assorbita dalla terra; (5) Radiazione impiegata nella fotosintesi; (6) Radiazione spesa nell'evaporazione dell'acqua; (7) Radiazione in arrivo assorbita dall'atmosfera; (8) Onda lunga di radiazione emessa dalla terra; (9) Onda lunga di rad. proveniente direttamente dallo spazio esterno; (10) Onda lunga di radiazione assorbita o riflessa dall'atmosfera o dalle nubi; (11) Energia spesa nella formazione dei venti; (12) Onda lunga di radiazione riflessa dall'atmosfera e dalle nubi verso terra; (13) Porzione di (12) riflessa dalla terra; (14) Radiazione riflessa dall'atmosfera e dalle nubi verso lo spazio esterno.

cioè nel senso di soglie o limiti sia specifici che come parte di ritmi stagionali o diurni. I bisogni cambiano a seconda dei tipi di coltura e delle fasi di crescita e sviluppo: nel processo vegetativo vi è dunque una successione di stadi qualitativi da seme a seme.

A maggior chiarimento riportiamo qui il noto disegno sintetico dei movimenti e delle trasformazioni dell'energia solare (Fig. 42).

Da notare che l'aria al livello delle colture non è riscaldata in grande misura dai raggi solari che l'attraversano, ma piuttosto dalla temperatura del terreno vicino

che ha assorbito i raggi. L'aria è anche riscaldata da condensazione di vapor d'acqua, come pure rinfrescata dall'evaporazione. L'aria quindi, essendo sempre in movimento, tende a ripetere le caratteristiche delle aree di recente origine, il che spiega fra l'altro perché in estate il monzone atlantico è umido, mentre l'harmattan di NE è caldo e secco.

3.2.2. DISTRIBUZIONE ZONALE E VARIAZIONI STAGIONALI

In conseguenza del regime di radiazione solare prima descritto (3.1.), le temperature sono regolarmente alte nelle regioni considerate, mentre le variazioni stagionali sono relativamente limitate (Fig. 44 che vedremo). Si ricorderà che vi è un aumento progressivo delle medie nella prima parte dell'anno che viene interrotto dalle precipitazioni estive con il punto più basso nel mese di agosto, e una successiva ripresa col ritiro a S della ZCIT, ripresa che si cancella poi durante l'inverno. Nel Sahel questo minimo estivo è naturalmente inferiore (temperatura più alta) e più breve. Diamo qui la distribuzione zonale del mese più caldo dell'anno (Fig. 43).



Fig. 43. Distribuzione della media mensile massima più calda dell'anno (WMO - No 210.TP.110).

3.2.3. EFFETTI QUALITATIVI DELLA TEMPERATURA SULLE COLTURE

È improbabile che in queste regioni si registrino durante la stagione agricola temperature al disotto del bisogno minimo vegetativo; infatti i 15°C possono essere considerati come la più alta di queste temperature limitative della vegetazione e solo per certe colture (per es. il cotone). Diamo qui appresso un prospetto delle possibili soglie limite con l'indicazione del tempo in cui si verificano durante il periodo di disponibilità idrica (Fig. 44). Come si vede, se temperature minime inferiori ai 15°C si registrano nel Sahel, ciò avviene solo durante i tre mesi invernali, per cui non possono avere effetti negativi sulle colture secche estive.

Può essere invece che si registrino temperature troppo alte, ma ciò non è emerso chiaro dai dati biologici e agronomici disponibili. Si hanno senza dubbio temperature massime al disopra dei 40°C, ma nessuna media mensile superiore a questo livello è stata mai registrata durante la stagione agricola. D'altra parte la limitata variabilità

stagionale fa sì che gli scarti rispetto alle medie possano solo essere dell'ordine di pochi gradi, per cui uno scarto di $\pm 5^\circ\text{C}$ fra le medie estreme mensili è più o meno la norma.

Le temperature minime e massime esercitano effetti sulle colture solo per poco tempo. Come si vede si sono calcolate anche le medie mensili durante le ore

	Maximum $> 40^{\circ}\text{C}$												Effective night $> 26^{\circ}\text{C}$										Effective night $> 28^{\circ}\text{C}$											
	4	5	6	3	4	5	6	1	2	12	3	4	5	6	7	8	9	10	3	4	5	6	7	8	9	10	3	4	5	6	7	8	9	
Agades			o		o		o	o	o	o		o	o	o	o	o	o																	
N'Guigmi																																		
Gao			o	o	o		o	o	o	o		o	o	o	o	o	o	o																
St. Louis																																		
Tahoua					o	o						o	o	o	o																			
Abeche					o	o						o	o	o	o	o	o																	
Matam			o		o	o		o				o	o	o	o	o	o	o																
Mopti					o	o		o				o	o	o	o	o	o	o																
Zinder					o			o				o	o	o	o	o	o	o																
Dakar Yoff																																		
Birni N' Koni					o	o						o	o	o	o	o	o																	
Niamey			o		o							o	o	o	o	o	o	o																
Maradi					o			o	o	o		o	o	o	o	o	o	o																
Fort Lamy					o	o		o				o	o	o	o	o	o	o																
Maiduguri					o			o	o	o		o	o	o	o	o	o	o																
Thies																																		
Segou																																		
Sokoto												o	o	o	o	o	o	o																
Kayes		o	o			o	o					o	o	o	o	o	o	o																
Maroua												o	o	o	o	o	o	o																
Mongo		o			o	o						o	o	o	o	o	o	o																
Kano								o	o	o		o	o	o	o	o	o	o																
Kaele												o	o	o	o	o	o	o																
Quagadougou												o	o	o	o	o	o	o																
Am Timan								o	o			o	o	o	o	o	o	o																
Bouso												o	o	o	o	o	o	o																
Tambacounda					o							o	o	o	o	o	o	o																
Garoua												o	o	o	o	o	o	o																
Pala												o	o	o	o	o	o	o																
Navrongo												o	o	o	o	o	o	o																
Bamako												o	o	o	o	o	o	o																
F Archambault												o	o	o	o	o	o	o																
Boto Dioulasso												o	o	o	o	o	o	o																
Moundou												o	o	o	o	o	o	o																
Kaduna												o	o	o	o	o	o	o																

Fig. 44. Eventualità di possibili temperature limite. I numeri 1-12 sulla seconda colonna orizzontale sono i mesi dell'anno. Sigle periodi: -| o in parte preparatorio, o |- in p. semi-umido, □- in p. umido, | o preparatorio, o | pre- e post-umido, □ umido.

diurne e notturne. Alte temperature effettive diurne al disopra dei 37°C si registrano solo durante il periodo preparatorio (P inferiori a $E_T/2$) nei mesi di maggio e giugno in poche stazioni. Qualche rischio per contro si può correre con le alte temperature effettive notturne durante le piogge estive: ciò può essere dovuto ad eventuali alti livelli di nebulosità e umidità atmosferica che impediscono di notte una perdita di energia per radiazione a partire dalla terra. Come si vede dal prospetto, temperature notturne effettive di 26°C (limite di sicurezza) sono frequenti nei periodi pre- e post-umido e talora anche in quello umido. Temperature effettive notturne di 28°C possono aversi nei periodi pre- e post-umido, ma non in quello umido. Durante il periodo intermedio pre-umido d'altra parte ci si può attendere alte

temperature a seguito di accidenti nella transizione dal harmattan al monzone, specie nei casi di « falsa partenza » della stagione monsonica.

In conclusione temperature chiaramente nocive per le colture, oltre i 44°C di giorno e oltre i 26°C di notte di durata non brevissima non si registrano nelle regioni considerate durante la stagione agricola.

3.2.4. TEMPERATURE CUMULATE

Per alcune delle colture praticate nell'area considerata e in determinati periodi dell'anno, certe fasi dello sviluppo vegetativo (come la fioritura, o la spigatura per le Graminacee) hanno bisogno di particolari livelli di temperature cumulate, in

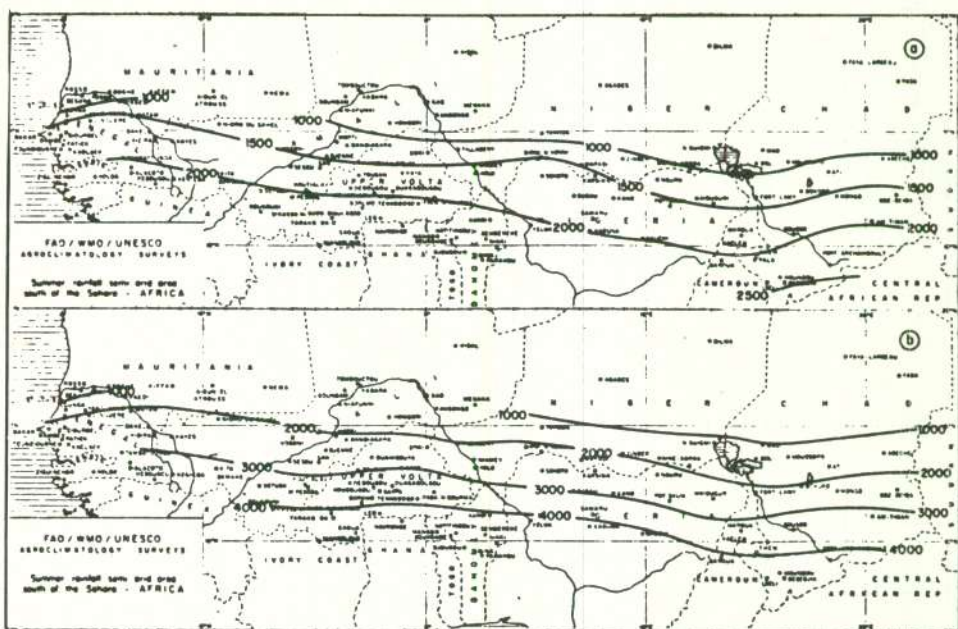


Fig. 45. Somme di temperature cumulate in gradi/giorno durante (a) il periodo post-umido con riserva a partire da 15°C; (b) il primo periodo intermedio e il periodo umido a partire da 0°C (WMO - No 210.TP.110).

termini di somma di gradi/giorno. Un diagramma della distribuzione zonale di queste temperature cumulate presuppone la conoscenza delle date degli eventi biologici (semina, potatura, ecc.) che non sono disponibili; ma si è visto che questi fatti biologici possono essere associati a fatti climatologici quali l'inizio e la fine dei periodi di disponibilità idrica, dei quali le date principali sono note: si sono così potute calcolare le temperature cumulate per questi periodi. Diamo qui la distribuzione zonale delle temperature cumulate per i due momenti corrispondenti alla fase vegetativa e alla fase di fioritura (Fig. 45). Si noterà che la distribuzione è sempre zonale e che le somme minori corrispondono ai periodi più corti, ma non in modo perfettamente

inverso perché nel Sahel durante il periodo vegetativo le temperature sono più alte che altrove, in certo modo compensando in piccola misura la maggiore brevità della stagione. Per completare l'informazione sinottica diamo i dati delle medie mensili delle temperature massime (Fig. 46), delle medie mensili delle temperature minime (Fig. 47), delle temperature effettive notturne (Fig. 48).

3.2.5. VARIABILITÀ

Studi su campione (N'Djamena in Ciad) hanno mostrato che la variabilità inter-annuale per periodi di 5 giorni nei mesi di giugno e agosto registrava coefficienti di 0,07 e 0,08, il che indica che temperature di 5°C più alte della media potrebbero aversi approssimativamente solo una volta in più di 20 anni.

3.3. Luce solare

3.3.1. FOTOPERIODISMO

Le variazioni stagionali nella durata della luce solare sono esigue, data la bassa latitudine: nel Sahel lo scarto annuale è appena di ore 1,59' nel N (a 17°N) e di ore 1,15' nel S (a 11°N).

Lat.	G	F	M	A	M	G
11°	11,56	11,77	12,07	12,38	12,63	12,76
12°	11,51	11,74	12,07	12,40	12,68	12,82
13°	11,45	11,71	12,06	12,43	12,73	12,88
14°	11,40	11,67	12,06	12,45	12,78	12,94
15°	11,35	11,64	12,05	12,48	12,83	13,01
16°	11,29	11,61	12,05	12,51	12,88	13,07
17°	11,24	11,58	12,05	12,53	12,93	13,13
	L	A	S	O	N	D
11°	12,70	12,48	12,19	12,88	11,63	11,50
12°	12,75	12,51	12,19	11,86	11,58	11,44
13°	12,81	12,55	12,20	11,84	11,54	11,38
14°	12,87	12,59	12,21	11,82	11,49	11,32
15°	12,93	12,62	12,22	11,80	11,44	11,26
16°	12,98	12,66	12,22	11,78	11,39	11,20
17°	13,04	12,69	12,23	11,76	11,35	11,14

Abbiamo dato sopra la lunghezza media mensile del giorno in ore e per gradi di latitudine. Bisogna notare che queste differenze, sebbene piccole, hanno effetti molto efficaci sulla fioritura o sulla spigatura di molte delle colture praticate. Poiché infatti la stagione delle colture secche si estende attraverso le giornate più lunghe dell'anno, le piante che vi si adattano fioriscono nel corso di giornate di decrescente lunghezza dopo il solstizio d'estate. Dal punto di vista del fotoperiodismo deve trattarsi di varietà di giornata breve (o neutre, se sono varietà a ciclo breve). Questo è generalmente il caso, perché fra i due estremi si hanno varietà presentanti vari gradi di fotoperiodismo di giornata breve.

Di conseguenza due sono gli adattamenti necessari per cereali che debbano sfruttare al massimo la stagione vegetativa con la fioritura prima della fine del periodo umido: a) un adattamento di ciclo vegetativo che consenta la fioritura (o spigatura)

	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Agadès	29.5	32.5	36.7	40.1	41.6	41.6	39.1	36.9	38.4	37.2	34.3	25.4
N'Guigmi	29.6	31.9	35.8	37.8	39.0	38.5	36.0	33.5	35.0	36.1	33.5	29.7
Gao	31.1	34.0	37.6	40.9	42.5	41.8	38.3	35.4	38.0	39.5	36.8	31.8
St. Louis	27.4	27.2	27.2	25.6	25.3	28.1	29.2	29.9	30.8	30.7	30.0	27.9
Tahoua	32.0	34.9	38.5	40.8	40.3	38.3	34.0	32.0	33.8	37.6	36.2	32.2
Abéché	36.0	37.2	40.0	41.5	40.5	38.9	34.5	31.4	34.2	37.8	37.2	35.4
Matam	32.9	35.3	39.1	41.3	42.1	39.7	35.0	33.0	33.1	34.9	35.1	31.7
Mopti	31.3	34.6	37.8	40.1	40.5	38.2	34.0	31.4	32.3	34.2	34.2	31.0
Zinder	30.7	34.0	38.0	40.2	39.7	37.6	33.2	31.2	33.3	37.1	35.2	31.0
Dakar	24.6	24.0	24.3	24.9	26.1	28.5	30.0	29.3	30.4	30.3	29.1	26.3
Birni N'Konni	32.6	35.5	39.4	40.9	40.0	36.9	33.0	31.4	32.8	36.6	36.6	32.9
Niamey	33.5	36.4	39.7	41.4	39.8	36.7	33.2	31.3	33.0	37.2	37.2	33.6
Maradi	31.8	34.6	38.8	40.5	39.1	36.7	32.3	30.6	32.1	35.9	35.5	31.9
Fort Lamy	32.6	35.1	38.6	41.0	40.2	37.1	32.9	30.2	32.7	36.0	36.5	33.7

Fig. 46. Medie mensili di temperature massime per 14 stazioni di cui 12 saheliane. I periodi di disponibilità idrica sono indicati con linea continua per il periodo umido e con linea tratteggiata per i periodi intermedi.

	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Agadès	10.7	13.7	18.1	22.0	24.9	24.8	23.8	23.1	23.0	20.4	15.9	12.5
N'Guigmi	12.5	14.8	19.3	21.2	23.7	24.1	24.1	23.1	23.0	20.3	16.7	13.1
Gao	14.0	15.4	19.9	23.3	26.5	27.5	25.6	24.1	24.7	23.9	19.6	15.3
St. Louis	16.4	16.5	16.6	17.5	19.2	22.9	24.7	25.0	25.2	24.4	20.8	17.5
Tahoua	15.0	18.1	22.3	24.1	26.3	24.8	23.2	22.1	22.4	21.8	19.7	15.9
Abéché	16.0	18.1	22.1	23.9	24.8	24.5	22.9	21.2	20.7	20.5	19.8	16.7
Matam	13.9	15.5	18.0	21.4	25.1	25.9	22.0	23.6	23.1	23.6	19.8	15.7
Mopti	13.8	16.1	19.7	23.8	25.2	24.3	23.2	22.7	23.2	22.7	19.0	15.4
Zinder	14.5	17.3	22.0	24.7	25.6	24.3	22.1	21.7	22.2	22.0	19.1	15.6
Dakar	17.7	16.8	17.0	18.3	20.0	23.2	24.5	25.1	24.4	24.4	22.9	19.9
Birni N'Konni	13.5	17.7	22.0	24.7	26.3	25.2	23.1	22.3	22.5	21.2	18.2	16.1
Niamey	15.6	17.8	22.4	25.6	26.9	25.1	23.2	22.5	22.7	23.0	19.0	15.0
Maradi	12.8	14.0	19.7	22.7	24.6	23.8	22.0	21.1	21.5	19.3	15.4	12.8
Fort Lamy	13.6	16.0	20.2	24.3	25.0	23.2	22.5	22.0	22.3	21.4	18.4	15.3

Fig. 47. Medie mensili di temperature minime per 14 stazioni di cui 12 sabeliane. I periodi di disponibilità idrica sono indicati con linea continua per il periodo umido e con linea tratteggiata per i periodi intermedi.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Agadès	15.4	18.4	22.7	26.5	29.0	29.0	27.6	26.6	26.9	24.6	20.5	16.7
N'Guigmi	16.7	19.0	23.4	25.5	27.5	27.7	27.1	25.7	26.0	24.3	20.9	17.2
Gao	18.3	20.8	24.3	27.7	30.5	31.1	28.8	26.9	28.0	27.8	23.9	19.4
St. Louis	19.1	19.2	19.2	19.6	20.8	24.2	25.9	26.3	26.6	26.0	23.1	20.1
Taboua	19.5	21.7	26.0	28.6	30.0	28.6	24.9	24.7	25.4	25.8	23.3	20.0
Abéché	20.4	23.0	26.6	28.2	28.9	28.1	25.7	23.2	23.9	25.0	23.8	21.3
Matam	18.7	20.5	23.3	26.4	29.4	29.4	26.8	26.0	26.0	26.4	23.6	19.7
Mopti	18.2	20.7	24.2	27.9	29.0	28.0	25.9	24.9	25.6	25.6	22.8	19.3
Zinder	18.5	21.4	26.0	28.6	29.2	27.9	25.3	24.1	24.9	25.7	23.1	19.5
Dakar	19.5	18.6	18.9	19.9	21.6	24.6	25.7	26.1	25.9	25.9	24.7	21.7
Birni N'Konni	20.0	22.1	26.3	28.7	29.7	28.1	25.6	24.6	25.0	25.1	22.8	20.3
Niamey	20.1	22.4	26.7	29.6	30.1	28.0	25.7	24.7	25.2	26.6	23.5	20.2
Maradi	17.5	19.1	24.4	27.1	28.2	27.0	24.5	23.4	24.1	23.4	20.4	17.5
Fort Lamy	18.7	21.1	25.5	28.5	28.5	27.0	24.9	24.2	24.5	25.0	22.6	19.5

Fig. 48. Temperature effettive notturne per 14 stazioni di cui 12 sabeliane. I periodi di disponibilità idrica sono indicati con linea continua per il periodo umido e con linea tratteggiata per i periodi intermedi.

a un intervallo ottimale dalla germinazione (si tratta di un periodo che può meglio esprimersi in gradi/giorno di temperature cumulate che in numero di giorni); b) un adattamento fotoperiodico che possa determinare la fioritura quando la durata delle notti raggiunge una certa lunghezza.

Per cereali idonei a una località determinata avente le durate volute della stagione vegetativa e delle sue parti, il processo di questi due adattamenti si trova 'in fase'. Ma una tale sincronizzazione può non verificarsi in altre località anche nella medesima regione e dal clima apparentemente simile. Anche se la pluviometria annuale è la stessa, il suo calendario può essere diverso (abbiamo visto, per es., che il monzone è ritardato nel Sahel occidentale). Ciò può far sì che il periodo umido intervenga a una data più tarda rispetto alla durata del giorno. Anche la curva verso S che si nota nelle isoiete nella parte centrale delle regioni considerate può creare piccole differenze nel rapporto fra fine del periodo umido di una certa durata e lunghezza del giorno. Un cereale seminato in una località o a una data tali da creare una sfasatura in relazione al ciclo vegetativo e alla fioritura sarebbe senz'altro colpito nelle rese.

3.3.2. PRODUZIONE DI MATERIA SECCA

È noto che, le altre condizioni essendo eguali, la produzione di materia secca delle piante, corrispondente alla fotosintesi netta, riflette un certo equilibrio fra temperature diurne e notturne. La temperatura infatti influenza sia il grado della fotosintesi che il processo di trasformazione dei glucidi in amidi attraverso la sottrazione di acqua per respirazione. Di notte il processo è interrotto, per cui temperature notturne relativamente alte nuocciono alla produzione. In queste regioni lo scarto di 20°C delle temperature si riduce alla metà durante le piogge, perché alla riduzione dei

massimi non corrisponde una riduzione simile dei minimi. Vi è quindi la possibilità di una eccessiva flessione della produzione di materia secca.

È parimenti noto che il grado e la misura totale della fotosintesi dipendono dalla quantità e dalla intensità di luce disponibile, non solo di per se stessa, ma anche in relazione alle temperature ambiente regolanti i ritmi metabolici generali. Per ogni serie di condizioni date sembra inoltre sussistere, ai fini di una produttività massima, una situazione ottimale dell'indice di superficie fogliare, o rapporto fra superficie fogliare e superficie del suolo. Un metodo semplice di comparazione fra temperature cumulate e luce solare è il rapporto fra radiazione globale giornaliera in cal/m^2 e temperature medie giornaliere in $^{\circ}\text{C}$ (Gaslin, 1944). Nelle regioni considerate questo indice eliotermico è più basso che in Europa (Francia, 40 nella tarda primavera e 20 in autunno) durante la stagione vegetativa perché, come si è visto, se le temperature sono più alte, la radiazione globale è circa la metà rispetto all'Europa: nelle regioni considerate sono stati accertati valori fra 13 e 18, con una flessione verso la metà della stagione (Fig. 49). Da quanto detto si può dedurre che in queste regioni la durata e l'intensità della luce solare, quando associate a prevalenti temperature elevate, possono essere limitative della produzione di materia secca nelle colture dense, specie nella parte S e quindi in ogni caso meno nel Sahel.

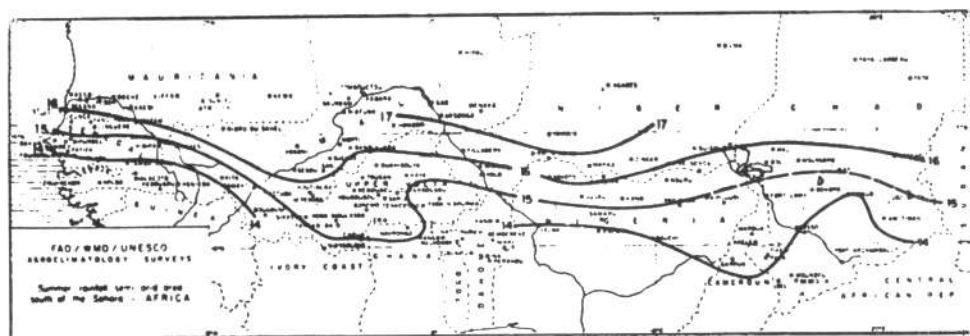


Fig. 49. Distribuzione media territoriale del coefficiente R_g/C nel mese di agosto (WMO - No 210.TP.110).

3.3.3. CONCLUSIONI

Le alte temperature, che sono conseguenza del regime di radiazione, vengono ridotte a valori più accettabili per le colture durante la stagione delle piogge.

Le colture di queste regioni sono a fotoperiodismo breve o neutre. Le caratteristiche fisiche del periodo vegetativo anteriore alla fioritura o spigatura, e le caratteristiche fotoperiodiche di queste ultime, non variano uniformemente da una località all'altra.

La produzione di materia secca può venir limitata da relativamente alte temperature notturne, e da una relativamente insufficiente luce solare, però più nel S che nel Sahel.

Ritourneremo sulle caratteristiche dei fenomeni eliotermici in connessione con le singole colture (cap. XII).

3.4. Aspetti agronomici del complesso eliotermico

È utile, anche a prezzo di qualche ripetizione, riassumere gli aspetti agronomici del complesso eliotermico, per ricordare qualche nozione di base, e per tentare una sintesi dei fenomeni vegetativi e di sviluppo delle colture in clima tropicale.

3.4.1. ASPETTI FISICO-CLIMATICI

Nell'energia globale disponibile bisogna distinguere: a) l'energia radiante luminosa (400 a 720 m μ) e l'energia radiante non luminosa, componenti della radiazione globale; b) l'energia termica che ha per origine in un punto dato la frazione delle energie radianti dissipata in calore, ed eventualmente l'avvezione di calore da altre zone tramite le correnti d'aria.

Orbene, se l'energia globale nelle regioni tropicali non è limitativa, salvo a volte che per il suo eccesso, la sua componente luminosa può in realtà limitare l'attività fotosintetica. Per una coltura ricoprente totalmente il terreno, la luce è più che saturante nella parte del fogliame più o meno direttamente esposta alla radiazione; ma non lo è generalmente più quando la superficie fogliare è considerata nella sua totalità, a causa dell'auto-ombreggiamento ai livelli inferiori della vegetazione.

La luce interviene d'altra parte nei fenomeni fotoperiodici con una certa durata di illuminamento o lunghezza del giorno. Questo problema non può essere trattato separatamente da quello delle temperature che intervengono a loro volta nel processo vegetativo o che interferiscono col fotoperiodo in due modi: la somma delle temperature o temperature cumulate, e la termoperiodicità od oscillazione delle temperature diurna e notturna.

Mentre lo *sviluppo* va visto come successione di stati qualitativi che conduce nella vita di una pianta 'da seme a seme', la *crescita* è invece la risultante dei fenomeni di moltiplicazione e di ingrandimento cellulare (accumulazione di materia secca nel corso dello sviluppo). Crescita e sviluppo evolvono in maniera indipendente e possono quindi essere visti separatamente.

La *crescita ponderale*, manifestazione dell'ingrandimento cellulare, è una risultante dei processi di fotosintesi e di respirazione (o fotosintesi netta). È dunque funzione (facendo astrazione dal fattore acqua), sia della luce e del tenore in CO₂ (reazione luminosa e fotochimica), sia della temperatura (reazioni oscure del metabolismo). La velocità di crescita seguirebbe la legge del Q₁₀ di Van't Hoffe fra temperatura minima specifica (10 a 15°C per le colture tropicali in genere) e la temperatura ottimale (31 a 37°C), per decrescere poi rapidamente fino ad annullarsi al massimo tollerabile (44 a 50°C). Di fatto queste temperature ottimali, minime, massime, medie, del giorno e della notte, non hanno probabilmente alcun reale significato fisiologico, neppure nello sviluppo. È dunque indispensabile considerare indipendentemente i valori termici diurni e notturni. Sembra, per es. che una crescita conveniente, che dipende dal rapporto fotosintesi/respirazione, non sia realizzabile nella maggioranza

delle piante altro che *se la temperatura notturna è notevolmente inferiore a quella diurna*. Ciò spiega l'importanza dell'oscillazione diurna-notturna (termoperiodicità) nel corso delle 24 ore, in relazione ai fenomeni di ordine climatico che la determinano (nebulosità, grado di continentalità, ecc.). Durante il giorno la fotosintesi è il fattore limitativo della crescita ponderale, ma resta tale solo se i fenomeni della fase oscura (trasformazioni, migrazioni, accumulazioni dei metaboliti) si svolgono entro margini di temperatura ottimale, che saranno probabilmente differenti dal margine ottimale di temperatura diurna per la fotosintesi. L'optimum della fase oscura si trova anche influenzato dall'intensità luminosa e dalla durata del fotoperiodo (da cui l'interesse del rapporto radiazione/temperatura di Geslin): non potendo esso essere fissato, siamo costretti ad accettare un concetto di margine piuttosto che un valore determinato. Sembra che una temperatura limite della fase oscura si situi sui 26°C: al disopra molte piante non crescerebbero più e alcune certamente deperirebbero. Come si è visto a questa temperatura ci si avvicina spesso durante il periodo umido.

Quanto allo *sviluppo*, esso può essere modificato, come la crescita, a seconda che, per una stessa temperatura giornaliera, le fasi diurna e notturna si svolgano a valori differenti, la temperatura notturna restando l'elemento più determinante nella fioritura di certe specie e varietà (Kimball). Un abbassamento progressivo della temperatura notturna e una riduzione del suo margine tollerabile di variabilità sembrano comunque necessarie per l'evoluzione della pianta dalla fase vegetativa alla fruttificazione. Probabilmente tuttavia non dobbiamo vedere nella reazione alla termoperiodicità che un fenomeno secondario rispetto alla reazione fotoperiodica: la prima non è induttrice della fioritura, contrariamente alla seconda. Nelle varietà fotoperiodiche tutto si svolge come se l'induzione alla fioritura dipendesse dal fotoperiodo, e il suo avviamento dalle temperature. Del resto con le specie di giornata breve, che possono cioè avere varietà di giornata breve e neutre, è la somma delle temperature (notturne a quanto sembra) che pare determinare l'avviamento della fioritura in colture preventivamente indotte dallo specifico fotoperiodo, oppure per via naturale nelle varietà neutre.

Quanto a una *classificazione fotoperiodica*, essa può essere fatta su queste basi in relazione alle specie e varietà di piante coltivate in regioni tropicali e che sono tutte a giornata breve o neutre:

- a. Piante strettamente non fotoperiodiche (neutre), nelle quali l'avviamento floreale è strutturalmente legato a uno stadio di sviluppo *minimo*, misurato in numero di nodi; questo numero è da parte sua linearmente funzione della somma delle temperature; in queste piante (per es. il cotone) numero di nodi e somma delle temperature nella fase di avviamento sono costanti.
- b. Piante strettamente fotoperiodiche, nelle quali la fioritura, a una latitudine determinata, sarà indotta sempre alla medesima data, quella in cui viene raggiunto il fotoperiodo critico; l'avviamento allora non dipenderà più che dalla somma delle temperature (notturne al caso, per tutte le piante a giornata breve); numero di nodi e somma delle temperature sono sempre linearmente legati, ma la fioritura non avverrà sempre allo stesso nodo, né alla stessa temperatura cumulata.
- c. Piante a reazione fotoperiodica debole (per es. il gruppo di varietà di sorgo dette precoci): queste piante, quando si trovano in situazione di fotoperiodo induttore,

si comportano come le precedenti (b), l'avviamento della fioritura dipendendo dalla somma delle temperature; in situazione di fotoperiodo non induttore avranno un comportamento intermedio fra (A) e (B), l'avviamento non essendo che ritardato.

3.4.2. IMPLICAZIONI AGRONOMICHE

La produttività finale di una *pianta isolata* è funzione della superficie fogliare totale, a partire dal momento della fioritura. La produttività di una pianta isolata o in coltura densa è anche funzione del numero finale di nodi (o numero totale di foglie). La superficie fogliare può essere considerata come il prodotto fra il numero attuale delle foglie e la loro superficie media. Il numero di nodi, o di foglie, è espressione della moltiplicazione cellulare (o sviluppo vegetativo), indipendente dalla crescita ponderale. Mentre il numero di nodi nelle varietà neutre è unicamente funzione della somma delle temperature, nelle varietà fotoperiodiche è in pratica determinato dalla interferenza dei due fattori da cui dipende l'avviamento floreale, ossia le temperature cumulate e il fotoperiodo.

La superficie fogliare è invece espressione della crescita ponderale, che indica l'importanza della fotosintesi netta: dipende dunque dai fattori dell'ambiente climatico, ma anche dalla fertilità del suolo. Facendo qui astrazione dalla fertilità e dall'elemento acqua, la produttività finale di una pianta isolata dipenderà dalla *durata del periodo di sviluppo* (numero di nodi) e dalla *velocità di crescita* (superficie fogliare media). Più breve sarà stato il periodo vegetativo, più la produzione di materia secca sarà esigua in relazione a una velocità di crescita determinata. Nel corso di una stagione umida di una durata data, il numero dei nodi aumenterà con la temperatura, il che è un elemento positivo. Allo stesso modo l'attività fotosintetica, dunque la velocità di crescita, di una pianta isolata varierà in misura assai considerevole con la temperatura: aumenterà con essa fino al momento in cui, diventando il CO_2 fattore limitativo, la respirazione aumenterà da sola. In questo momento la temperatura rappresenterà l'ottimo diurno.

Il rendimento invece di una *coltura* (in opposizione a una pianta isolata) è funzione non più direttamente della superficie fogliare, ma del rapporto fra questa e la superficie coperta, o 'indice della superficie fogliare' (leaf area index, di Watson - LAI). A causa dell'auto-ombreggiamento non tutta la superficie fogliare è saturata di luce, per cui fotosintetizza in misura ineguale dalla sommità alla base del fogliame, la frazione non saturata aumentando con lo sviluppo e la crescita. Da notare che, se nelle condizioni delle colture africane tradizionali « non migliorate » la questione della saturazione di luce per tutto il fogliame non si pone a causa della scarsa concentrazione della coltivazione, il fatto non costituisce un vantaggio perché sono allora queste condizioni generali medesime che limitano le rese.

L'indice della superficie fogliare comunque, in condizioni di temperatura e di luce determinate, viene ad assumere un valore *ottimale* secondo il quale la parte di fogliame più debolmente illuminata lo è a una intensità prossima a quella corrispondente al punto di compensazione. Questo valore rende dunque *massimale* la fotosintesi netta: $dw/dt = (dP - dR)/dt$. Fino al raggiungimento di questo valore ottimale dell'indice, la produzione di materia secca (dw/dt) aumenterà con l'intensità della fotosintesi (dP/dt), dopo di che andrà diminuendo quando comincerà a cre-

scere l'intensità della respirazione (dR/dt), dato che la parte di fogliame illuminato al disotto del punto di compensazione avrà, a seguito della forte respirazione, una fotosintesi netta negativa.

In queste condizioni un aumento dell'intensità luminosa (senza grande interesse per la produttività di una pianta isolata), aumentando il valore ottimale dell'indice della superficie fogliare (LAI, dunque il valore dP/dt), sarà favorevole alle rese; al contrario un aumento della temperatura farà aumentare il valore fino al punto di compensazione (e quindi il valore dR/dt) diminuendo il valore ottimale LAI, col risultato di essere sfavorevole alle rese; e ciò tanto più in quanto il rinnovo degli strati d'aria nella massa di una coltura essendo meno rapido che per una pianta isolata, il tenore in CO_2 ha tutte le probabilità di essere limitativo anche per una parte del fogliame saturato di luce.

Relativamente ai valori dell'indice della superficie fogliare, il rapporto fra luce solare e temperatura diurna ha dunque un significato fisiologico e agronomico evidente: ma luce e temperatura sono nelle regioni tropicali strettamente collegate, e anche gli sfasamenti che possono determinarsi fra di esse, provocati a ogni istante dalla nebulosità e dalla pioggia, come anche gli effetti di serra, le avvezioni di calore, ecc. potrebbero avere un ruolo non trascurabile nella produzione della materia secca, indipendentemente dalla loro incidenza sull'apporto di acqua alle colture. Ecco il motivo per cui si giustifica lo studio del rapporto radiazione-temperatura, anche se i suoi valori medi per periodi di tempo più o meno lunghi non possano che imperfettamente rendere conto dei valori istantanei.

In conclusione, oltre all'obiettivo sopra indicato, lo studio del complesso eliometrico dovrà tener conto: a) delle incidenze prima accennate della temperatura notturna sulla crescita e lo sviluppo; b) del fatto che le temperature minime in stagione secca sono un fattore importante della velocità di sviluppo delle colture; c) del fatto che le temperature massime possono essere limitative nelle regioni tropicali come lo sono le minime nelle regioni temperate.

Questo studio in sostanza si riassume nel compito di considerare la distribuzione nello spazio e nel tempo delle seguenti variabili, che potranno essere — sia singolarmente che combinate — altrettante variabili indipendenti da apprezzarsi nell'equazione di regressione multipla delle rese, come si può vedere nella parte finale della trattazione del bilancio idrico: a) la radiazione nelle sue differenti forme; b) le temperature media, minima, massima, diurna e notturna; c) le temperature cumulate (somma); d) i fotoperiodi; e) la relazione radiazione-temperatura. Quest'ultima relazione in particolare assume significati fisiologici e agronomici diversi a seconda che si consideri: a) il valore R della radiazione globale (espressione molto approssimativa dell'illuminazione), oppure la sua intensità — $I = R/Ld$ (Ld essendo la durata del giorno); b) la temperatura nictemerale T (24 ore), diurna (T_d), notturna (T_n), o ancora la somma delle temperature della fase notturna — $T_n \cdot Lu$ (Lu essendo la durata della notte). Oltre alle variazioni della relazione R/T , considerato in senso classico ma senza significato fisiologico preciso, bisognerà almeno studiare quelle della relazione I/T_d , espressione delle variazioni relative dell'intensità luminosa e della temperatura diurna in rapporto alla fotosintesi netta.