

GIUSEPPE A. MAGAZZÙ

LA CRESCITA FITOPLANCTONICA IN ALCUNI AMBIENTI LAGUNARI DEL MAR MEDITERRANEO

RIASSUNTO

Viene effettuata una stima del tasso specifico di crescita delle bioecnosi fitoplanctoniche di cinque ambienti lagunari del Mar Mediterraneo. I risultati, espressi in raddoppi di carbonio cellulare/giorno (doubling/day), sono stati ottenuti mediante misure del tasso fotosintetico e determinazioni di clorofilla attiva dall'espressione:

$$\mu \text{ (dupl./giorno)} = \frac{1}{\Delta t} \log_2 \frac{(R + PB)}{R}$$

Il valore di R, rapporto del C fitoplanctonico con la clorofilla non degradata, è stato calcolato per ciascun ambiente e stagione da misure del Numero di Assimilazione PmB, utilizzando le relazioni che legano quest'ultimo alla temperatura ed a μ .

In due delle lagune studiate (Laguna di Venezia e Rada di Augusta) erano in atto, al momento delle misure, dei « blooms » fitoplanctonici causati da crisi eutrofiche. Il tasso di crescita è stato stimato in 1.4 (max 2.3) e 1.5 (max 2.7) dupl./giorno, rispettivamente. Delle altre lagune, quella del Faro, esaminata durante il periodo invernale (gennaio-marzo), pur risultando caratterizzata da una biomassa e un tasso fotosintetico elevati, ha esibito valori di crescita stazionari e relativamente modesti: media generale di 0.37 dupl./giorno con min 0.31 e max 0.48 dupl./giorno. Per lo Stagnone di Marsala e l'area lagunare di Taranto sono stati presi in considerazione due cicli stagionali completi. La media dei valori stagionali per Taranto è risultata di 0.31 dupl./giorno (min. 0.03, max 0.91), inferiore a quella dello Stagnone che è stata di 0,93 dupl./giorno (min 0.44, max 2.28) nonostante la notevole consistenza della biomassa e del tasso fotosintetico verificati specialmente nel Mar Piccolo di Taranto. In ogni caso, i valori massimi del Tasso Specifico di Crescita delle bioecnosi fito-

planctoniche lagunari studiate sono stati osservati in corrispondenza delle temperature più elevate.

L'analisi di regressione multipla fra sei parametri, scelti a definire l'ecosistema, e il tasso di crescita ha consentito di individuare nella temperatura e nel Numero di Assimilazione le variabili più significative con un'incidenza sulle variazioni di μ superiore al 50% mentre l'apporto dei nutrienti e della clorofilla è risultato trascurabile.

Il numero e il Quoziente di Assimilazione, infine, sono apparsi correlati in modo altamente significativo con la temperatura, secondo un andamento di tipo esponenziale.

SUMMARY

Phytoplankton growth-rate estimates in some brackish lagoons of the Mediterranean sea.

Estimates of phytoplankton growth-rate in five brackish lagoons of the Mediterranean Sea were calculated using an equation expressing μ , the doubling of cellular carbon/day, in terms of the C/chlorophyll a ratio and the photosynthetic rate per weight of chlorophyll a:

$$\mu = \frac{1}{\Delta t} \log_2 \frac{(R + PB)}{R}$$

R was derived seasonally and locally using the Assimilation Numbers and the relationship between T° and μ max proposed by Eppley.

In the Venice lagoon and in the Rada di Augusta sampling was carried out during an eutrophic bloom. The mean specific growth rates were 1.4 (max 2.3) and 1.5 (max 2.7) doubling/day respectively. In the Faro lake, studied only in winter, values of μ were quite constant and low (0.37 doubling/day, range: 0.31-0.48) associated with nutrient-rich and productive waters. An opposite trend was found in the Stagnone di Marsala: higher growth rates (0.93 doubl./day, range: 0.04-2.28) associated with nutrient-poor waters. In the Taranto lagoon area μ averaged 0.31 doubl./day (range: 0.03-0.91) with high biomass and nutrients concentrations. Maxima of specific growth rate, however, occurred last summer, associated with the highest temperatures.

A step-wise multiple regression analysis, using a set of 6 independent variables representative of the ecosystems, has shown that temperature and Assimilation Number were the most significant contributors (> 50%) of the observed variation in μ , while nutrients (PO_4 and NH_4) and chlorophyll contributions were insignificant.

Assimilation Numbers and photosynthetic rate per weight of chlorophyll a, in a separate regression analysis, were highly correlated with temperature in an exponential pattern.

Key words: Phytoplankton - lagoons - Mediterranean.

INTRODUZIONE

La produzione di materia vivente nel mare si basa sulla crescita del fitoplancton nella zona eufotica e nel trasferimento del materiale prodotto ai livelli superiori. Alla crescita fitoplanctonica sono collegati innumerevoli processi secondari interdipendenti i cui effetti, non ancora del tutto chiari,

esercitano un'influenza spesso decisiva sul processo primario rendendo difficile la sua interpretazione. Anche per questi motivi la misura del tasso di crescita del fitoplancton in ambienti naturali non può, a tutt'oggi, considerarsi una procedura di routine. Inoltre, altre difficoltà ne hanno limitato la diffusione come l'inadeguatezza dei metodi analitici e una certa resistenza dimostrata in passato dai biologi marini ad accettare misure di tipo dinamico negli ambienti naturali. Tuttavia, superata almeno questa ultima posizione mentale grazie ai progressi degli studi sulla dinamica delle popolazioni e sulla applicabilità di modelli matematici in grado di prevedere lo sviluppo degli ecosistemi acquatici, sono rimaste le non poche difficoltà di carattere metodologico.

La determinazione del tasso di crescita, μ , richiede, infatti, una misura istantanea dello « standing stock » in unità di massa e il tasso orario o giornaliero della medesima grandezza. Fra i componenti cellulari, probabilmente, neanche il carbonio può fornire misure accurate del tasso di crescita dal momento che i prodotti finali della sintesi e lo stesso tasso di assimilazione dei nutrienti della cellula fitoplanctonica non aumentano esponenzialmente con la medesima velocità. Il concetto di « crescita bilanciata » è fondamentale, come puntualizzato da SHUTER (1979) e più recentemente da EPPLEY (in corso di stampa), per l'impiego dei parametri necessari alle misure del tasso di crescita. Il problema deriva dal fatto che le cellule fitoplanctoniche crescono e si dividono in un ambiente naturale caratterizzato da cicli nictimerali. In tali condizioni le velocità dei processi misurati per brevi periodi possono non riflettere un ciclo giorno-notte di 24 ore. In queste condizioni i tassi di sintesi dei prodotti finali della fotosintesi possono variare nelle loro porzioni relative e dipendono fortemente dalle condizioni ambientali attuali o storiche intrinseche all'ecosistema (MORRIS, in corso di stampa). Pertanto, condizioni che favoriscano l'aumento della sintesi dei prodotti di riserva, ad esempio, possono fornire valori del tasso di crescita superiori al reale in quanto la cellula tende ad accumulare e non a dividersi. Comunque sia, allo stato attuale delle nostre conoscenze la misura accurata dello « standing stock » e quella del tasso di assimilazione del carbonio, magari estesa ad un congruo periodo di tempo, costituiscono uno dei metodi più realistici. Però, se da una parte il tasso orario e giornaliero dell'assimilazione del carbonio può considerarsi una misura sufficientemente agevole e precisa mediante la tecnica del C^{14} i metodi per l'analisi diretta del carbonio cellulare nelle acque marine sono scarsamente precisi a causa delle interferenze dovute all'impossibilità di separare la componente di detrito organico ed inorganico del C (EPPLEY, 1972; EPPLEY *et al.*, 1977). Di norma si impiegano metodi indiretti sulla cui validità il precedente Autore fornisce una

dettagliata analisi critica. Ulteriori limitazioni per l'uso di tali metodologie vengono segnalate da BANSE (1980) mentre quelle dirette — osservazione microscopica durante il periodo della divisione cellulare — (SWIFT e DURBIN, 1972; WEILER, 1980) risultano di scarsa applicabilità routinaria negli ambienti naturali e, comunque, limitate ad una o due specie dell'intera biocenosi planctonica.

In considerazione delle suseposte difficoltà, per questo studio, che intende fornire delle stime preliminari sul tasso della crescita fitoplanctonica nei nostri ambienti lagunari, è stato utilizzato un metodo teorico-sperimentale che collega direttamente alcuni importanti indici fisiologici delle biocenosi planctoniche: il Numero di Assimilazione, la temperatura, il rapporto C/clorofilla e μ max. Esso ha già fornito risultati accettabili per le acque marine del largo (MAGAZZÙ, in preparazione) e probabilmente sarà possibile migliorarne la formulazione. È certo tuttavia, che una misura più realistica di μ potrà essere ottenuta dal concorso di più tecniche sperimentali che tengano in conto la complessa fisiologia della crescita planctonica.

MATERIALI E METODI

I campioni sono stati prelevati ed analizzati in occasione di una serie di studi effettuati in vari ambienti lagunari e salmastri delle coste italiane. La prima indagine in ordine di tempo è stata un ciclo stagionale, dal settembre 1972 al luglio 1973, nell'area lagunare del Golfo di Taranto. Il secondo studio è stato limitato alle condizioni invernali (gennaio-marzo 1972) del Lago di Faro, all'estremo N della Sicilia orientale. Un altro ciclo stagionale di quattro prelievi è stato effettuato dal luglio 1975 al maggio 1976 nello Stagnone di Marsala, lungo le coste occidentali siciliane. Gli studi nella Laguna Veneta si sono protratti da agosto a settembre del 1976 e da giugno a luglio del 1977, in occasione di una vasta indagine coordinata dalla TECNECO sulle condizioni ambientali della Laguna Veneta. I dati della Rada di Augusta, infine, si riferiscono ad una ricerca effettuata in corrispondenza dei massicci fenomeni di eutrofia osservati nella Rada durante il settembre del 1977.

Nelle figg. 1-4 vengono indicati i punti di stazione per ogni laguna. Informazioni dettagliate sulle osservazioni chimico-fisiche e biologiche sono parzialmente disponibili in letteratura (PANELLA, in corso di stampa; MAGAZZÙ, 1977a-b; CESCONE et al., 1980).

Il tasso fotosintetico è stato misurato *in situ* con la tecnica del C^{14} ; inoltre, un sub-campione (Taranto e Marsala) è stato incubato a luce

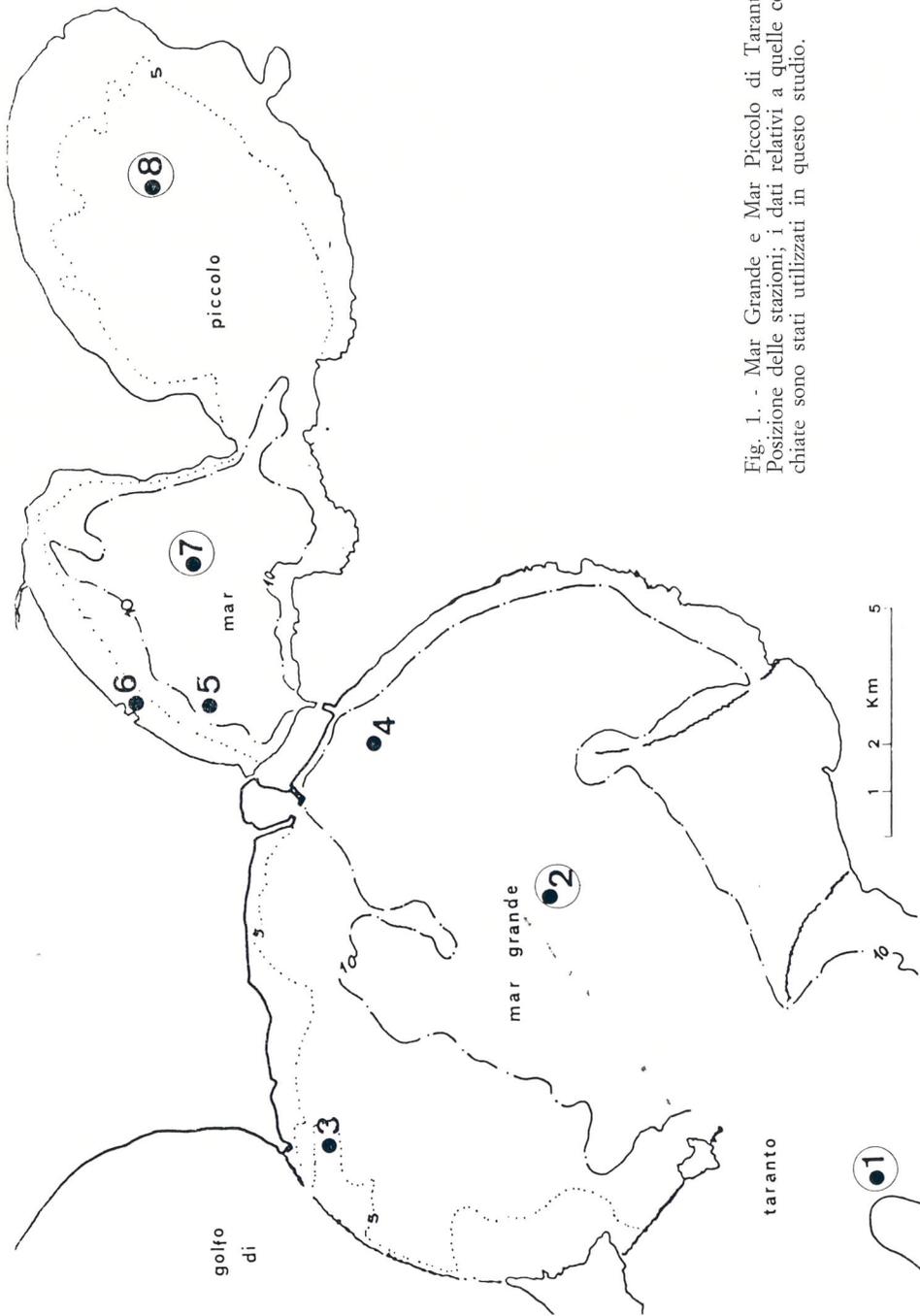


Fig. 1. - Mar Grande e Mar Piccolo di Taranto. Posizione delle stazioni; i dati relativi a quelle cerchiato sono stati utilizzati in questo studio.

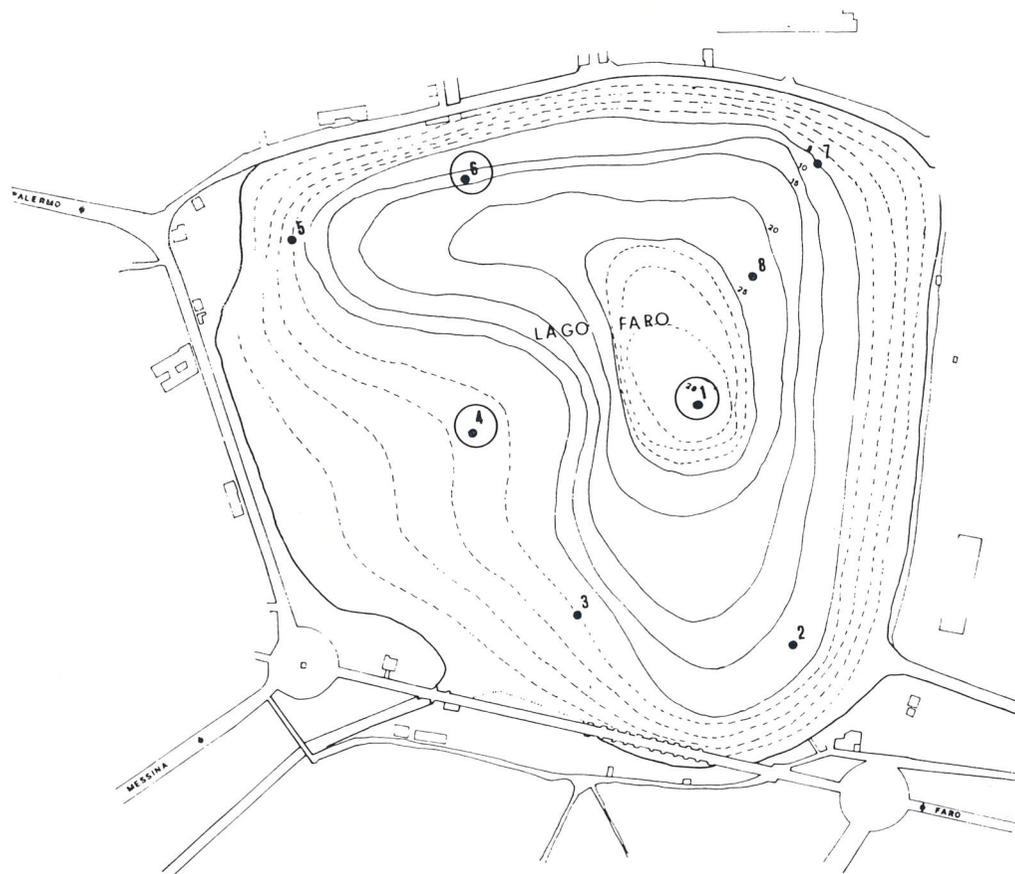


Fig. 2. - Lago del Faro. Posizione delle stazioni; i dati relativi a quelle cerchiato sono stati utilizzati in questo studio.

costante ($0.1 \text{ ly/min.} - 70 \text{ W/m}^2$) e alla temperatura di superficie per la misura del Numero di Assimilazione (N.A.). Questa intensità luminosa risulta compresa nell'intervallo di $0.04-0.2 \text{ ly/min.}$ ($28-140 \text{ W/m}^2$) indicato da RYTHER (1956) per l'inizio dei fenomeni di fotoinibizione per il fitoplancton e può considerarsi ottimale o di « sub-saturazione » per la crescita algale (PARSONS, TAKAHASHY e HARGRAVE, 1977; PLATT e JASSBY, 1976). La clorofilla attiva è stata determinata con il metodo spettrofluorimetrico. Per i procedimenti analitici si è proceduto secondo quanto

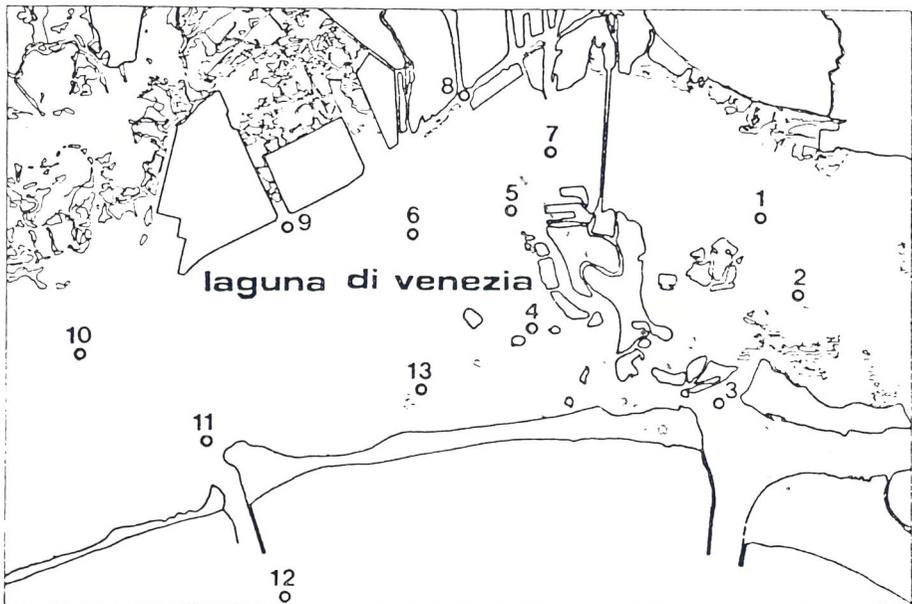
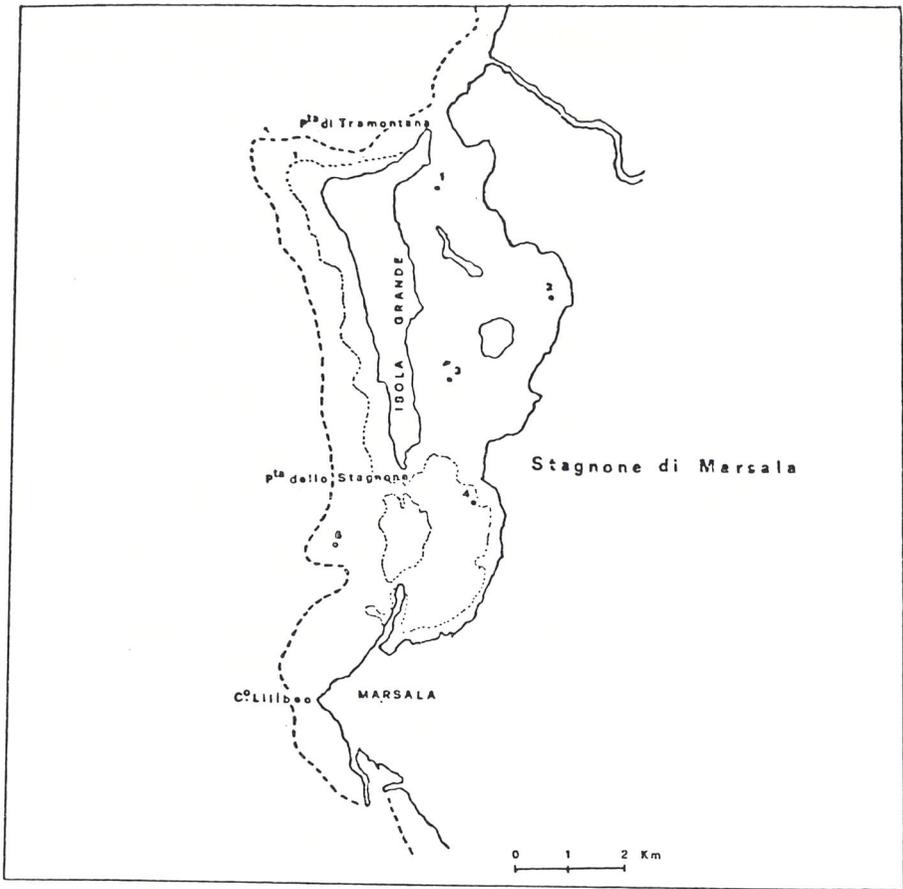


Fig. 3. - Stagnone di Marsale e Laguna Veneta. Posizione delle stazioni.

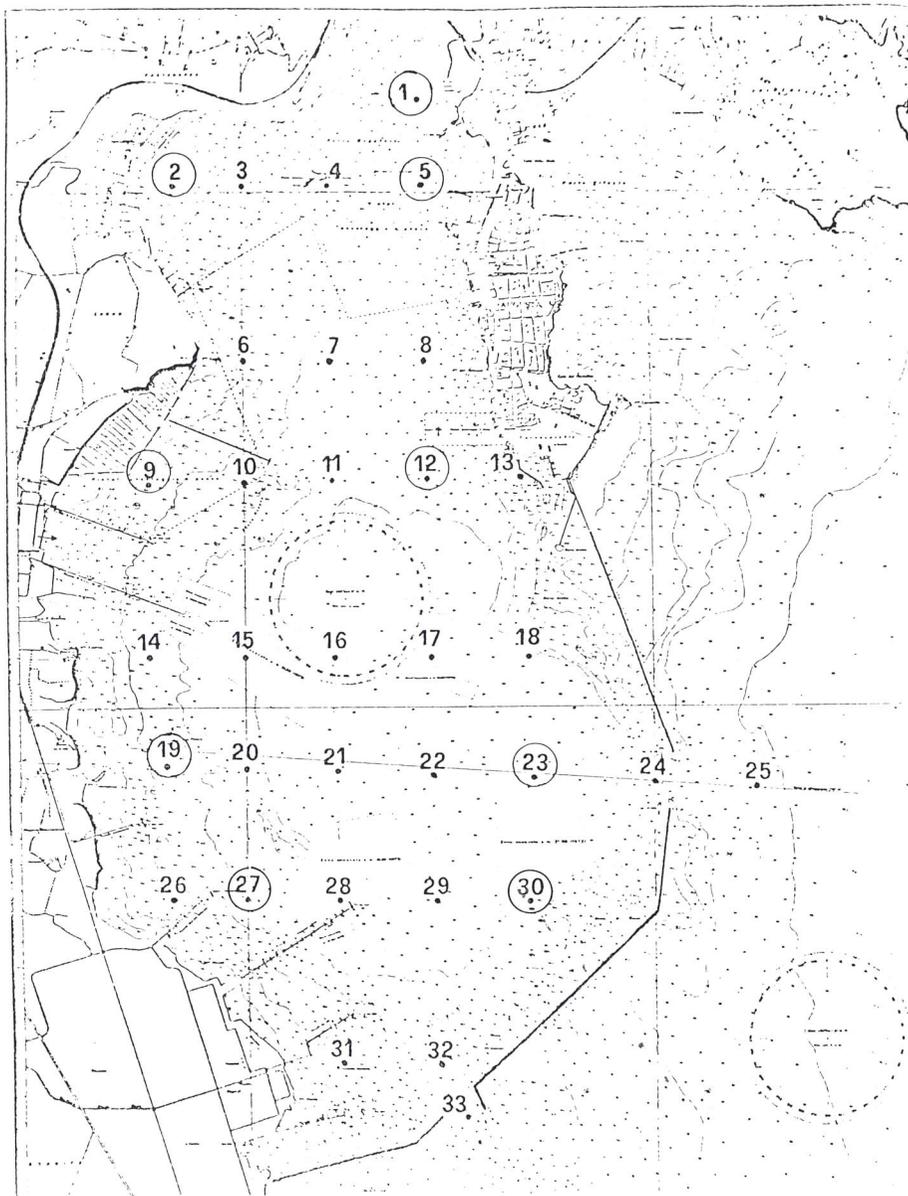


Fig. 4. - Rada di Augusta. Posizione delle stazioni; i dati relativi a quelle cerchiate sono stati utilizzati in questo studio.

descritto in « Metodi per lo studio del plancton e della produzione primaria » (MAGAZZÙ, 1978). La temperatura, i sali nutritivi e gli altri parametri qui utilizzati sono stati ottenuti secondo le metodiche di STRICKLAND e PARSONS (1972) e GENOVESE e MAGAZZÙ (1969). La radiazione totale incidente è stata calcolata da misure piranografiche dirette (Taranto, Faro, Marsala) o stimata (Venezia e Augusta) utilizzando la formula.

$$\bar{I} = \bar{I}_0 (0.3 + 0.7 \text{ Sr}) \text{ ly/giorno}$$

riportata da VOLLENWEIDER (1974) e le registrazioni di un eliofanografo. Il valore della PAR, E 350-700 in, ly/giorno, infine, è stato ottenuto moltiplicando la radiazione totale incidente per il fattore 0.425 (MOREL e SMITH, 1974).

Il Tasso Specifico di Crescita, μ , espresso in raddoppi di carbonio cellulare/giorno (doublings/day) è stato calcolato per ciascuna quota di campionamento (Taranto, Faro, Marsala) o solamente in superficie (Venezia, Augusta) in dipendenza della disponibilità delle misure di C^{14} o di clorofilla e della profondità del luogo. Per la sua determinazione è stata utilizzata un'equazione che esprime μ in termini di PB, il tasso fotosintetico per unità di clorofilla a, e del rapporto carbonio fitoplanctonico/clorofilla, C/CHL, parametri di rilevante interesse per lo studio della fisiologia del plancton vegetale:

$$\mu = \frac{1}{\Delta t} \log_2 \frac{(R + PB)}{R} \quad (1)$$

dove Δt = intervallo di tempo utilizzato per la misura di PB, espresso in giorni;

R = rapporto C/CHL;

PB = quoziente di assimilazione espresso, in mg C/m³/h/mg CHL a/m³.

Il valore del rapporto R è stato ricavato per gruppi omogenei di misure nello stesso ambiente e nel medesimo periodo in base a considerazioni teoriche e dati sperimentali utilizzando i rapporti che legano μ_{max} , il valore massimo predicibile del tasso specifico di crescita, alla temperatura per un'illuminazione 12 ore (EPPLEY, 1972):

$$\mu_{\text{max}} = \frac{1}{2} (0.851 \times 1.066^T) \quad (2)$$

ed il Numero di Assimilazione più elevato, PmB, misurato mediante le incubazioni a luce costante nella colonna d'acqua. Ponendo nella (1) al posto di μ e PB rispettivamente μ_{\max} e PmB e uguagliandola alla (2) si ottiene:

$$\frac{1}{2} (0.851 \times 1.066^T) = \frac{1}{\Delta t} \log_2 \frac{(R + \text{PmB})}{R} \quad (3)$$

dalla quale, infine, si calcola R. In effetti, per le lagune dove si è campionato solo in superficie (Venezia e Augusta) non essendo disponibili misure dirette del N.A., in luogo di questo si è utilizzato il quoziente di assimilazione PB nell'ipotesi che quest'ultimo non si sarebbe discostato di molto da PmB per campioni esposti in superficie ad intensità prossime a quelle dell'incubatore.

In definitiva, si può osservare (fig. 5) che per ogni ambiente e durante il medesimo periodo i valori del N.A. si situano, in modo più o meno omogeneo, in zone comprese fra isolinee di A.N. ottenute dall'equazione (3) per diversi valori di R. I punti sperimentali del N.A. si dispongono, per campagna e per laguna, in zone di dispersione limitate da una curva corrispondente ad un dato valore di R, il minimo possibile, nelle condizioni sperimentali osservate.

RISULTATI

Nelle cinque lagune studiate sono state eseguite 79 prove sperimentali di cui 76 complete dei 6 parametri utilizzati in questo studio. I valori relativi alle stazioni di Taranto, Faro e Marsala, però, sono le medie ponderate di più quote in ognuna delle quali sono state eseguite tutte le misure sperimentali. Il totale dei dati utilizzati nelle analisi statistiche, pertanto, supera 700.

Nella tab. 1 vengono riassunti per ciascuna laguna e per tutti i risultati la media, la deviazione standard e il campo di variazione dei 6 parametri sperimentali e di quello derivato μ . La scelta dei parametri è stata indirizzata a comprendere le variabili più rappresentative dell'ecosistema: la temperatura (T) e la radiazione solare disponibile alla superficie per la fotosintesi, PAR, (E) come elementi di definizione delle condizioni fisiche. I fosfati (PO_4), l'ammoniaca (NH_4) e la clorofilla a (CHL) come indici, rispettivamente, del trofismo e della biomassa fitoplanctonica del sistema.

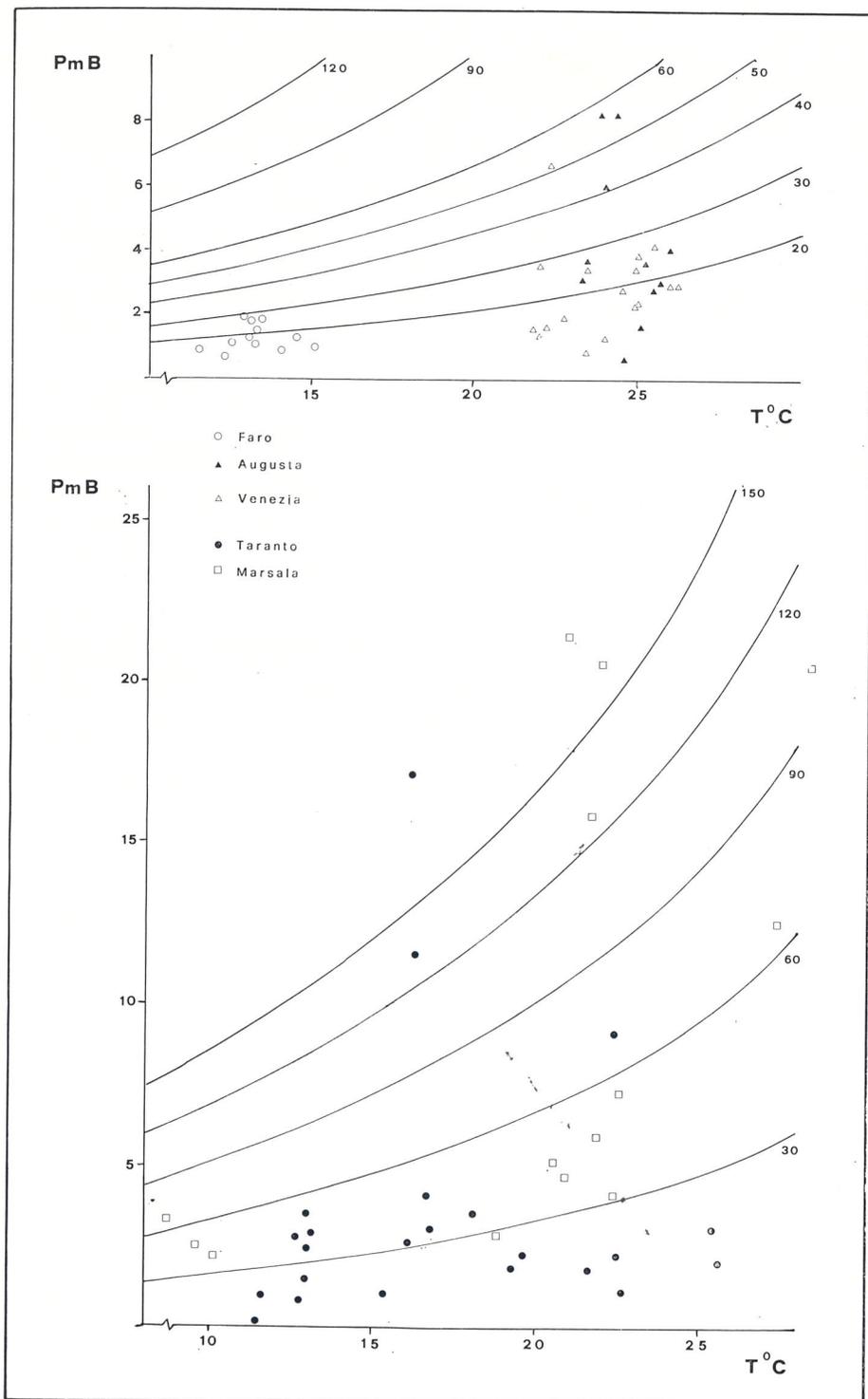


Fig. 5. - Dispersione del N. di Assimilazione (PmB) con la temperatura (T). Le esolinee rappresentano l'andamento del N.A. al variare del rapporto C/Clorofilla. Spiegazioni nel testo.

T_{ab}, I — T = temperatura in C°. E = Radiazione solare disponibile per la fotosintesi in ly/giorno. PO₄ = Fosfati solubili in µg-a/l. NH₄ = Ione ammonio in µg-a/l. CHL = Clorofilla a in mg/m³. µ = Tasso specifico di crescita in duplicazioni/giorno. PmB = Numero di assimilazione (mg C/mg CHL/h ad intensità di sub-saturazione).

	Margrande e Marpiccolo di Taranto			Lago di Faro			Stagnone di Marsala		
	media	deviazione standard	Campo di variazione	media	deviazione standard	Campo di variazione	media	deviazione standard	Campo di variazione
T	17.20	4.45	12.73-26.62	13.27	0.99	11.50-15.22	19.77	5.92	8.60-28.55
E	165	99	25-310	109	51	57-188	217	71	123-330
PO ₄	0.18	0.15	0.04-0.62	0.50	0.35	0.15-1.45	0.14	0.14	0.04-0.55
NH ₄	2.99	2.19	0.68-9.58	1.54	1.33	0.08-4.74	1.56	0.94	0.20-3.33
CHL	4.50	4.37	0.80-15.47	6.52	2.35	4.45-11.54	0.34	0.31	0.08-1.01
µ	0.31	0.24	0.03-0.91	0.37	0.17	0.18-0.75	0.93	0.55	0.04-2.28
PmB	3.57	3.93	0.18-17.26	1.26	0.43	0.69-1.92	9.57	7.23	2.24-21.37
Tutti i risultati									
	Laguna di Venezia			Rada di Augusta					
T	23.88	1.51	21.80-26.20	24.77	0.99	23.33-26.03	19.48	5.35	8.60-28.55
E	141	56	47-200	103	35	54-144	154	81	25-330
PO ₄	0.96	1.61	0.10-6.70	2.04	1.94	0.71-6.90	0.62	1.16	0.04-6.90
NH ₄	33.25	61.20	2.00-181.0	3.25	2.73	0.30-7.52	9.28	31.14	0.08-181
CHL	25.26	36.14	0.65-140.0	20.37	13.01	6.81-41.28	10.52	19.96	0.08-140
µ	1.38	0.46	0.60-2.31	1.46	0.68	0.28-2.67	0.82	0.64	0.03-2.67
PmB	2.69	1.39	0.84-6.62	3.22	1.55	0.59-6.10	4.15	4.79	0.18-21.37

Stagnone di Marsala. GdL = 14

	T	E	PO ₄	NH ₄	CHL	μ	PmB
T	1.000	0.785a	0.443	0.633b	-0.567c	0.810	0.590c
E		1.000	0.513c	0.224	-0.350	0.764a	0.166
PO ₄			1.000	-0.120	0.084	0.088	-0.052
NH ₄				1.000	-0.0460	0.544c	0.737b
CHL					1.000	-0.750b	-0.614c
μ						1.000	0.551c
PmB							1.000

Laguna di Venezia. GdL = 16

	T	E	PO ₄	NH ₄	CHL	μ	PmB
T	1.000	0.704a	0.344	0.524c	0.145	0.165	0.134
E		1.000	0.217	0.106	-0.108	0.031	0.106
PO ₄			1.000	0.802a	0.233	0.209	0.243
NH ₄				1.000	0.366	0.297	0.145
CHL					1.000	-0.290	-0.303
μ						1.000	0.731a
PmB							1.000

Tutti i risultati. GdL = 75

	T	E	PO ₄	NH ₄	CHL	μ	PmB
T	1.000	0.305c	0.293c	0.255c	0.294c	0.729a	0.260c
E		1.000	-0.122	-0.088	-0.156	0.161	0.209
PO ₄			1.000	0.549a	0.268c	0.328b	-0.104
NH ₄				1.000	0.445a	0.288c	-0.044
CHL					1.000	0.207	-0.184
μ						1.000	0.258c
PmB							1.000

fico di Crescita è risultato, con un'alta significatività, correlato con la temperatura e la radiazione incidente. Naturalmente, per misure limitate ad un determinato periodo dell'anno la significatività è stata nulla.

La correlazione di μ con i nutrienti è risultata variabile da ambiente ad ambiente: inversa in modo significativo per PO₄ e NH₄ nel lago di Faro e diretta, ma significativamente solo per l'ammoniaca, nello Stagnone di Marsala. Considerando tutti i risultati, tuttavia, sia il P che l'N hanno mo-

strato una dipendenza positiva statisticamente significativa con il tasso di crescita.

L'andamento delle correlazioni della clorofilla *a* con μ ha esibito caratteristiche simili a quelle dei nutrienti con i quali, peraltro, nel totale dei risultati, è apparsa direttamente dipendente in modo significativo.

Infine, le correlazioni, μ -PmB sono apparse positive e fortemente significative per il lago di Faro, lo Stagnone di Marsala, la Laguna Veneta e il totale dei risultati.

In conclusione, i parametri che maggiormente hanno influenzato la crescita negli ambienti lagunari studiati sono apparsi, di volta in volta, differenti ma tutti in diverso grado coinvolti. L'analisi di tutti i risultati ha limitato la significatività alle correlazioni della crescita con temperatura, nutrienti e stato fisiologico delle popolazioni fitoplanctoniche.

Un'analisi di regressione multipla lineare « step-wise » sui medesimi parametri, considerando μ come variabile dipendente, ha permesso di definire, sempre per singolo ambiente e per il totale dei dati (Tab. 3), le percentuali di incidenza di ciascun parametro, dei sei scelti per il sistema, sulla variabilità di μ . Le regressioni risultanti, altamente significative utilizzando i coefficienti di Fisher, hanno indicato nella temperatura e nel N.A. i fattori che hanno esercitato il maggior peso sul tasso di crescita nelle singole lagune. La regressione di tutti i dati ha posto il luce che il 58% delle variazioni di μ è da attribuire ai sei parametri scelti. Il maggiore contributo a tale variabilità è stato fornito dalla temperatura (53%) mentre PO_4 (2%), Numero di Assimilazione (1%), ammoniacale, redazione luminosa e biomassa (CHL) hanno contribuito per meno del 5%.

Tab. 3 — Regressione multipla lineare « step-wise » del tasso specifico di crescita (variabile dipendente) e parametri fotosintetici e ambientali in diversi ambienti lagunari e salmastri del Mar Mediterraneo. R = Coefficiente di correlazione multipla. ΔR^2 = incremento della varianza di μ . Var% = Percentuale della variazione di μ attribuibile alle variazioni dei 6 parametri scelti per l'analisi dell'ecosistema e la regressione con il tasso specifico di crescita.

Margrande e Marpiccolo di Taranto. GdL = 22

Step	Variabile	R	ΔR^2	F	Var%
1	E	0.722	0.521	22.82	52
2	T	0.811	0.136	19.23	14
3	PmB	0.819	0.013	12.86	1
4	CHL	0.822	0.005	9.34	<1
5	PO_4	0.324	0.003	7.20	<1
6	NH_4	0.826	0.003	5.72	<1

Equazione: $\mu = 0.0014 (E) + 0.0249 (T) + 0.0031 (PmB) - 0.0037 (CHL) - 0.3131 (PO_4) - 0.0159 (NH_4) - 0.3395$.

Lago di Faro. GdL = 11

Step	Variabile	R	ΔR^2	F	Var%
1	PmB	0.725	0.525	11.06	52
2	NH ₄	0.800	0.114	8.00	11
3	T	0.813	0.021	5.20	2
4	CHL	0.831	0.029	3.90	3
5	E	0.854	0.038	3.24	4
6	PO ₄	0.867	0.023	2.52	2

Equazione: $\mu = 0.2736 (\text{Pmb}) - 0.1085 (\text{NH}_4) - 0.0996 (\text{T}) - 0.0348 (\text{CHL}) + 0.0016 (\text{E}) + 0.1782 (\text{PO}_4) + 1.4779$.

Stagnone di Marsala. GdL = 14

Step	Variabile	R	ΔR^2	F	Var%
1	T	0.810	0.669	24.86	67
2	PO ₄	0.865	0.079	17.77	8
3	E	0.919	0.096	19.86	10
4	CHL	0.940	0.039	19.08	4
5	PmB	0.945	0.009	14.95	1
6	NH ₄	0.945	0.000	11.08	0

Equazione: $\mu = 0.0193 (\text{T}) - 1.2381 (\text{PO}_4) + 0.0051 (\text{E}) - 0.4227 (\text{CHL}) + 0.0118 (\text{PmB}) + 0.0052 (\text{NH}_4) - 0.3611$.

Laguna di Venezia. GdL = 16

Step	Variabile	R	ΔR^2	F	Var%
1	PmB	0.731	0.534	17.22	53
2	NH ₄	0.756	0.037	9.34	4
3	PO ₄	0.783	0.041	6.85	4
4	CHL	0.803	0.032	5.44	3
5	T	0.807	0.006	4.10	<1
6	E	0.808	0.002	3.12	<1

Equazione: $\mu = 0.2266 (\text{PmB}) + 0.0051 (\text{NH}_4) - 0.1187 (\text{PO}_4) - 0.0026 (\text{CHL}) - 0.0476 (\text{T}) + 0.0005 (\text{E}) + 1.8498$.

Tutti i risultati. GdL = 75

Step	Variabile	R	ΔR^2	F	Var%
1	T	0.729	0.531	83.81	53
2	PO ₄	0.739	0.015	43.81	2
3	PmB	0.745	0.009	29.91	1
4	NH ₄	0.747	0.003	22.38	<1
5	E	0.748	0.001	17.83	<1
6	CHL	0.750	0.003	14.76	<1

Equazione: $\mu = 0.0822 (T) + 0.0516 (PO_4) + 0.0128 (PmB) + 0.0018 (NH_4) - 0.0005 (E) - 0.0017 (CHL) - 0.7862$.

Tab. 4 — Coefficienti di correlazione tra PB e PmB con T ed equazioni per ciascuna laguna e il totale dei risultati. ΔT = escursione massima di temperatura osservata durante il periodo delle misure.

	Equazione	ΔT	GdL	σ^2	r	r ²	p
Taranto	PB = 0.052×1.150^T	16.4	95	1.176	0.442	0.195	0.001
	PmB = 0.647×1.061^T		89	1.113	0.128	0.016	ns
Faro	PB = 0.557×0.996^T	3.4	44	1.187	-0.012	—	ns
Marsala	PB = 0.169×1.180^T	20.1	61	1.117	0.561	0.315	0.001
	PmB = 0.433×1.145^T		49	1.110	0.319	0.103	0.05
Venezia	PB = 0.240×1.100^T	4.4	16	1.129	0.134	0.018	ns
Augusta	PB = 7.470×0.961^T	2.7	8	1.250	-0.143	0.020	ns
Tutti i risultati	PB = 0.037×1.121^T	20.1	227	1.097	0.531	0.282	0.001
	PmB = 0.302×1.131^T		137	1.094	0.329	0.108	0.001

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Variabili ambientali e crescita fitoplanctonica

Nelle lagune dove era disponibile un ciclo stagionale completo di osservazioni, i parametri ambientali (T^o ed E) hanno rappresentato il fattore che maggiormente ha influito sullo sviluppo della crescita fitoplanctonica con un'incidenza sulla sua variabilità superiore al 60%. Nelle altre lagune, nelle quali le osservazioni sono state limitate ad un periodo determinato, ma si sono succedute in stagioni diverse, l'analisi dei risultati, considerati

insieme a tutti gli altri, ha indicato nella temperatura la variabile di maggior incidenza (53%).

Questi risultati sono in accordo con le più recenti osservazioni sui rapporti che legano la temperatura e la crescita del fitoplancton. Infatti, pur dovendosi considerare la fotosintesi in generale come una reazione atermica, tuttavia, l'intero complesso delle reazioni che ne regolano i processi nel fitoplancton risulta fortemente condizionato dalla temperatura. In particolare, l'andamento di μ max, può essere descritto, come già detto, mediante l'equazione (2), da una funzione esponenziale della temperatura (EPPLEY, 1972), con un Q10 di 1.88. Analoghe equazioni tra T° e μ max, nell'ambito dei limiti termici osservabili in natura, sono state formulate sia per singole specie (*Skeletonema costatum*; YODER, 1979), sia per popolazioni marine e d'acqua dolce coltivate in chemostato (GOLDMAN e CARPENTER, 1974) con un Q10 rispettivamente di 3.5 e 2.1, molto vicino, quest'ultimo, al valore di 2.17 ottenuto per μ dall'equazione di regressione di tutti i valori di questo studio.

È da presumere, inoltre, che negli ambienti lagunari e salmastri gli effetti di temperatura risultino potenziati dalla scarsa profondità e dalla distribuzione laminare del corpo idrico nel quale, generalmente, si osservano escursioni termiche molto maggiori di quelle usualmente registrate nel mare.

I nutrienti e la crescita del fitoplancton.

Il contributo dei sali nutritivi alla variabilità di μ nella regressione multipla « step-wise » estesa a tutti i risultati è apparso (Tab. 3) scarsamente significativo con un'incidenza per $PO_4 + NH_4$ inferiore al 2%. Tuttavia, dall'analisi dettagliata dei risultati relativi alle singole lagune si evidenzia che nel lago di Faro, nello Stagnone di Marsala e nella Laguna Veneta i fosfati e l'ammoniaca sono apparsi, da soli o insieme, in qualche modo, limitanti la crescita con un'incidenza di variabilità oscillante dal 4% all'11%. Valori modesti se confrontati con quelli della temperatura. D'altra parte, l'alta variabilità del Numero di Assimilazione e l'elevato valore di R, specie nello Stagnone, confermano ulteriormente l'azione limitante dei nutrienti. La concentrazione attuale di questi ultimi, ad ogni modo, non sempre costituisce un indice valido per l'accertamento del trofismo di un ecosistema a causa del riciclo, più o meno rapido, imputabile ai processi batterici e chimici di norma molto attivi negli ambienti lagunari. Sotto questo aspetto rivestono un certo interesse le condizioni dello Stagnone di Marsala dove, accanto a valori di PO_4 , NH_4 e CHL, è stato misurato un tasso fotosintetico che può considerarsi elevato, di 2.0 mg c/m³/h

(MAGAZZÙ, 1977). Una simile risposta ambientale, apparentemente contraddittoria, può spiegarsi se si ammette sia un rapido riciclo dei nutrienti, come farebbe supporre l'elevata biomassa e l'attività di taluni gruppi fisiologici batterici individuati nello Stagnone di Marsala da GENOVESE (1969), sia considerando che allo stato stazionario del sistema l'elemento limitante risulta a così scarsa concentrazione da apparire solo in tracce o assente a causa dell'elevata affinità del fitoplancton verso di esso e, tuttavia, in grado di assicurare a causa di ciò, un alto livello di crescita indipendentemente dalla biomassa presente (GOLDMAN et al., 1979).

Numero di Assimilazione, clorofilla a e Tasso Specifico di Crescita.

L'analisi delle correlazioni semplici e della regressione multipla fra P_{mB} e μ conferma la validità dell'equazione (3) e le ipotesi avanzate da EPPLEY (1972) circa la dipendenza del Tasso Specifico di Crescita dal quoziente PB e dal Numero di Assimilazione P_{mB} indici, entrambi, dello stato fisiologico del fitoplancton. Con l'esclusione di Taranto, infatti, le correlazioni fra P_{mB} e μ sono risultate fortemente significative (limiti di fiducia da 95% a 99,9%) soprattutto in quelle lagune dove gli effetti di temperatura non erano direttamente evidenziabili durante le osservazioni a causa della scarsa variabilità termica nell'ambiente ma erano stati registrati dalle biocenosi attraverso i meccanismi di adattamento fisiologico.

D'altra parte, la dipendenza del Numero di Assimilazione dalla temperatura sembra potersi considerare un fatto indiscutibile convalidato da una quantità sempre crescente di prove sperimentali. A partire dalle prime osservazioni di CURL e SMALL (1965) circa la sua variabilità in zone del largo, altri ricercatori hanno dimostrato l'esistenza di una sua correlazione significativa con la temperatura in un ampio spettro di ambienti costieri (WILLIAMS e MURDOCH, 1966; JEHIMURA, 1967; MANDELLI et al., 1970; YENTSCH et al., 1974; DURBIN et al., 1975; MALONE, 1977; HARRISON e PLATT, 1980; MALONE e NEALE, 1981) e lacustri (STADEEMAN et al., 1974). Tale significatività può essere estesa anche agli ecosistemi lagunari salmastri (MAGAZZÙ, in preparazione): in Tab. 4 vengono riportate le correlazioni e le equazioni relative all'analisi PB, P_{mB} e T° per le cinque lagune studiate. I coefficienti di correlazione (0.53 e 0.33 rispettivamente) indicano che almeno il 28% della varianza di PB è in rapporto con la temperatura.

La scarsa incidenza della concentrazione della clorofilla a sulla variabilità di μ , infine, rappresenta un'ulteriore conferma della maggiore adeguatezza dei parametri fisiologici rispetto a quelli ambientali per la definizione della dinamica degli ecosistemi lagunari e costieri.

Il Tasso Specifico di Crescita in ambienti eutrofizzati

Le stime di μ riportate in questo studio si riferiscono a cinque ambienti diversi. Almeno due di essi (Venezia e Augusta), al momento dei prelievi presentavano sicuramente i sintomi di una crisi eutrofica. Il Mar Piccolo di Taranto, poi, in occasione del campionamento di luglio appariva anch'esso in fase di « bloom » fitoplanctonico. Come si è già visto, il Tasso Specifico di Crescita a Venezia e Augusta è risultato mediamente superiore a 1.3 dupl./giorno con massimi di oltre 2.3 dupl./giorno, ma nel Mar Piccolo μ è sempre rimasto inferiore all'unità. Questi valori possono considerarsi elevati in rapporto alle stime disponibili per acque marine mesotrofiche oscillanti fra 0.3 e 0.6 dupl./giorno (EPPLEY, 1972) e, in definitiva, caratterizzanti di ambienti eutrofizzati. D'altra parte, per lo Stagnone di Marsala, che non ha mai presentato (almeno durante le nostre osservazioni) i sintomi di una esplosione eutrofica, è stato ottenuto un valore medio di μ poco inferiore all'unità con un massimo superiore a 2 dupl./giorno. Questi risultati apparentemente in contrasto riflettono una certa conflittualità rilevabile anche in letteratura. Ad esempio, EPPLEY (1972) conclude che un alto valore del Tasso di Crescita debba considerarsi tipico di un ambiente eutrofizzato mentre altri Autori (KOBLENTZ-MISHKE e VEDERNIKOV, 1976; SCHELDON e SUTCLIFFE, 1978) hanno trovato valori di μ elevati in acque oligotrofiche e povere di nutrienti.

A parte i dubbi che possono venir suscitati dal confronto di risultati ottenuti mediante le diverse metodologie utilizzate dagli Autori (EPPLEY, in corso di stampa), il problema della quantizzazione dei fenomeni di crescita in un ecosistema eutrofizzato esistono, se non altro, per disporre di un valido strumento di previsione e lotta a questo tipo di inquinamento (MAGAZZÙ, in corso di stampa). Per contro, nel lago di Faro, sono stati osservati valori elevati di biomassa, di nutrienti e di produzione primaria contro un tasso di crescita modesto per un ecosistema nel quale, durante il periodo estivo, si verificano « blooms » a fitoflagellati con numeri dell'ordine di 10^6 cell./l (BRUNI et al., 1976). Non v'è dubbio, almeno in questo caso, che l'adattamento fisiologico alle basse temperature invernali abbia influito sui processi della crescita ma una tale problematica, evidenziata anche per le acque salmastre, soprattutto dalle osservazioni nello Stagnone di Marsala, potrebbe trovare una soluzione ove si individuassero i meccanismi naturali di contenimento e/o di distruzione dell'elevata biomassa prodotta.

Ringraziamenti. — Si ringraziano i dott. SERGIO PANELLA del Laboratorio Centrale di Idrobiologia di Roma e BRUNO CESCONE della Soc. TECNECO per aver consentito l'utilizzazione di dati ottenuti in occasione delle campagne di studio in comune effettuate rispettivamente a Taranto e Venezia.

BIBLIOGRAFIA

- BANSE K., 1980 — Microzooplankton interference with ATP estimates of plankton biomass. — *J. Plankton Res.*, 2: 235-238.
- BRUNI V., COSTANZO G., DE DOMENICO E., DE DOMENICO M., FARANDA F., GANGEMI G., GIUFFRÉ G., GUGLIELMO L. e MANGANARO A., 1976 — Ricognizione ambientale nel lago salmastro di Faro (Messina). Un anno di osservazioni (aprile 1973-aprile 1974). — *Atti Soc. Peloritana Sci. Fis. Mat. Nat.*, 22: 1-115.
- CESCON B., DE ANGELIS U., IOVENITTI L., ISOLATI A., ALFASSIO GRIMALDI S. e MAGAZZÙ G., 1978 — The modelling of the trophic behaviour of the Venice lagoon. — *Math. Models Mar. Ecosystems*, 135-156.
- CURL JR. H. and SMALL L. F., 1965 — Variations in the photosynthetic assimilation ratios in natural, marine phytoplankton communities. — *Limnol. Oceanogr.*, 10: R67-R73.
- DURBIN E. G., KRAWIEC R. W. and SMAYDA T. J., 1975 — Seasonal studies on the relative importance of different size fractions of phytoplankton in Narragansett Bay (USA). — *Mar. Biol.*, 32: 271-287.
- EPPLEY R. W., 1972 — Temperature and phytoplankton growth in the sea. — *Fish. Bull.*, 70: 1063-1085.
- EPPLEY R. W., HARRISON W. G., CHISHOLM S. W. and STEWART E., 1977 — Particulate organic matter in surface waters off Southern California and its relationship to phytoplankton. — *J. Mar. Res.*, 35: 671-696.
- EPPLEY R. W., 1980 — Relations between nutrient assimilation and growth in phytoplankton with a brief review of estimates of growth rate in the ocean. *Proceedings of NATO Summer School in phytoplankton Ecology*. — Lipari, 14-26 ottobre.
- GENOVESE S., 1969 — Données écologiques sur le « Stagnone » de Marsala (Sicile occidentale). — *Rapp. Comm. int. Mer Médit.*, 19: 823-826.
- GENOVESE S. e MAGAZZÙ G., 1969 — Manuale d'analisi per le acque salmastre. — *La Ed. Universitaria*, Messina, 1-134.
- GOLDMAN Y. C. e CARPENTER E. J., 1974 — A kinetic approach to the effect of temperature on algal growth. — *Limnol. Oceanogr.*, 19: 756-766.
- GOLDMAN Y. C., MC CARTHY Y. Y. and PEAVY D. G., 1979 — Growth rate influence on the chemical composition of phytoplankton in oceanic waters. — *Nature*, 279: 210-215.
- HARRISON W. G. and PLATT T., 1980 — Variations in assimilation of coastal marine phytoplankton: effects of environmental co-variables. — *J. of Plankton Res.*, 2: 249-260.
- ICHIMURA S., 1967 — Environmental gradients and its relation to primary productivity in Tokyo Bay. — *Rec. Oceanogr. Works Jap.*, 9: 115-128.
- KOBLENTZ-MISKHE O. Y., VEDERNIKOV V. I. and SHIRSHOV P. P., 1976 — A tentative comparison of primary production and phytoplankton quantities at the ocean surface. — *Mar. Sci. Comun.*, 2: 357-374.
- MAGAZZÙ G., 1977 — Usefulness of the Marsala Lagoon for Acquaculture. I. Nutrients and primary production. — *Rapp. Comm. int. Mer Médit.*, 24: 81-82.
- MAGAZZÙ G., 1977 — Rapporto sui risultati delle ricerche svolte nella Rada di Augusta in occasione dei fenomeni di eutrofizzazione verificatisi nel settembre del 1977. — *Relaz. interna Staz. Biol. Mar. Univ. Messina*.
- MAGAZZÙ G., 1978 — Metodi per lo studio del plancton e della produzione primaria. — *Edizioni G. M.*, Vibo Valentia, 1-68.

- MAGAZZÙ G. — Tentativo per la definizione di limiti biologici e biochimici in ecosistemi con tendenza dell'eutrofizzazione. — *In corso di stampa*.
- MALONE T. C., 1977 — Light-photosynthesis by phytoplankton size fractions in the New York Bight, USA. — *Mar. Biol.*, 42: 281-292.
- MALONE T. C. and NEALE P. J., 1981 — Parameters of Light-Dependent photosynthesis for Phytoplankton size fractions in temperate estuarine and coastal environments. — *Mar. Biol.*, 61: 289-297.
- MANDELLI E. F., BURKHOLDER P. R., DOHENY T. E. and BRODY R., 1970 — Studies of primary productivity in coastal waters in southern Long Island, New York. — *Mar. Biol.*, 7: 153-160.
- MOREL A. and SMITH R. C., 1974 — Relation between total quanta and total energy for aquatic photosynthesis. — *Limnol. Oceanogr.*, 19: 591-600.
- MORRIS I., 1980 — Photosynthesis products, physiological state and Phytoplankton growth. Proceedings of NATO Summer School in Phytoplankton Ecology. — Lipari, 14-26 ottobre.
- PANELLA S. — Aspetti metodologici in ordine allo studio e al controllo dello smaltimento in mare dei residui di origine industriale. — *In corso di stampa*.
- PARSONS T. R., TAKAHASHI M. and HARGRAVE B., 1977 — Biological oceanographic processes. — *Pergamon Press*, Oxford, 1-332.
- PLATT T. and JASSBY A. D., 1976 — The relationship between photosynthesis and light for natural assemblages of coastal marine phytoplankton. — *J. Phycol.*, 12: 421-430.
- RYTHER Y. H., 1956 — Photosynthesis in the ocean as a function of light intensity. — *Limnol. Oceanogr.*, 1: 61-70.
- SHUTER B., 1979 — A model of physiological adaptation in unicellular algae. — *J. theor. Biol.*, 78: 519-552.
- STADELMANN P., MOORE J. E. and PICKETT E., 1974 — Primary production in relation to temperature, structure, biomass concentration and light conditions at an inshore and offshore station in Lake Ontario. — *J. Fish. Res. Board of Can.*, 34: 1215-1232.
- STRICKLAND J. D. H. and PARSONS T. R., 1972 — A practical handbook of seawater analysis. — *Fish. Res. Bd. Canada Bull.*, 169: p. 310.
- SWIFT E. and DURBIN E. G., 1972 — The phased division and cytological characteristics of *Pyrocystis* spp. can be used to estimate doubling times of their populations in the sea. — *Deep-Sea Res.*, 19: 189-198.
- VOLLENWEIDER R. A., 1974 — A manual on methods' for measuring Primary production in aquatic environments., TPB Handbook n. 12, Blackwell Sci. Publ. Oxford, 1-225.
- WEILER C. S., 1980 — Population structure and *in situ* division rates of *Ceratium* in oligotrophic waters of the North Pacific centrale gyre. — *Limnol. Oceanogr.*, 25: 610-619.
- WILLIAM R. B. and MURDOCH M. B., 1966 — Phytoplankton production and chlorophyll concentration in the Beaufort Channel, North Carolina. — *Limnol. Oceanogr.*, 11: 73-82.
- YENTSCH C. S., YENTSCH C. M., STRUPE L. R. and MORRIS I., 1974 — Influence of temperature on the photosynthetic efficiency in natural populations of marine phytoplankton. In: « Thermal Ecology. Savannah River Project, AEC Symp. Series Proc. » (Ed. J. W. Gibbons and R. R. Shartiz), 687.

- YODER J. A., 1979 — A comparison between the cell division rate of natural populations of the marine diatom *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve grown in dialysis culture and that predicted from a mathematical model. — *Limnol. Oceanogr.*, 24: 97-106.

Indirizzo dell'Autore. — Istituto di Idrobiologia, Università di Messina, Via dei Verdi 75, 98100 Messina (I).