

## MODELLO PREVISIONALE DELLE CONSEGUENZE DELL'AUMENTO DELLA TEMPERATURA E DELL'IRRADIANZA ULTRAVIOLETTA SULLA DINAMICA DI POPOLAZIONI ZOOPLANCTONICHE DI INTERESSE IN ACQUACOLTURA

MAURIZIO SEVERINI e ROBERTA ALILLA (\*)

\*Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima (ISAC-CNR), sezione di Roma

### INTRODUZIONE

L'oggetto di studio della nostra Unità di Ricerca (UR) è un modello di simulazione della dinamica di sviluppo e di accrescimento di popolazioni acquatiche peciloterme negli stadi giovanili del ciclo vitale (Severini & Gilioli, 2002). Le variabili di stato del modello sono le densità  $N_k(t)$  [ $\cdot$ ], i flussi  $R_k(t)$  [ $d^{-1}$ ] e le frequenze delle biomasse  $M_k(t)$  [g] degli individui delle popolazioni negli stadi giovanili  $k = 1, 2, \dots, K$  nel tempo  $t$ , misurato a partire dalla nascita. Le variabili forzanti del modello sono la temperatura  $T(t)$  [ $^{\circ}C$ ] e la dose di radiazione ultravioletta  $V(t)$  [ $J m^{-2}$ ] a cui sono esposte le popolazioni durante lo (o prima dello) sviluppo. Il modello si propone di prevedere l'effetto dell'aumento dei valori delle variabili forzanti sulle variabili di stato attraverso due diversi metodi (o modelli) di simulazione: matematica ed analogica.

Lo schema generale del ciclo vitale di una popolazione peciloterma è un modello a  $K$  compartimenti (Figura 1). I compartimenti indicano gli stadi (o le fenofasi) del ciclo vitale e le funzioni  $R_k(t)$  [ $d^{-1}$ ] il numero degli individui che escono giornalmente dal sub-stadio  $k$ -esimo

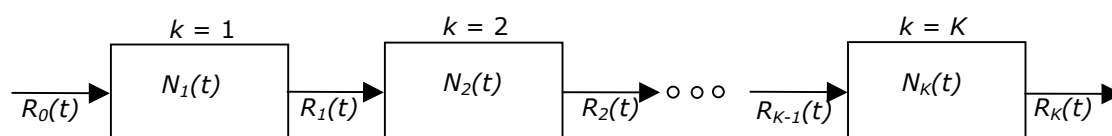


Figura 1. Schema del ciclo vitale di una popolazione.

I due metodi (o modelli) di simulazione sono elaborati 'in parallelo' e si integrano a vicenda. Il modello matematico indica gli esperimenti da eseguire ed il modello analogico fornisce le stime dei parametri e gli elementi di validazione. Nella fase di prototipo, il modello si riferisce a popolazioni delle Specie *Xenopus laevis* (Anfibi) e *Artemia franciscana*; tuttavia, cambiando i valori numerici dei parametri, esso può funzionare per la maggior parte delle Specie zooplanctoniche. Nel primo anno, le ricerche relative al modello analogico si sono svolte in laboratorio.

## IL MODELLO MATEMATICO

Il modello matematico di riferimento per le nostre ricerche è noto come Modello a Ritardo Distribuito (Distributed Delay Model, DDM), esso simula lo sviluppo di una popolazione in un sub-stadio del ciclo vitale (Figura 2). Manetsch (1976) ha proposto due versioni del DDM: una a Ritardo Invariante nel Tempo (Time Invariant Delay, TI) valida per simulare lo sviluppo a temperature costanti  $T(t) \equiv T = Costante$  e l'altra a Ritardo Variabile (Time Varying Delay, TV) per simulare lo sviluppo a temperatura variabile. Ambedue le versioni del DDM sono conservative e perciò vanno bene solo nei casi in cui lo sviluppo delle popolazioni è accompagnato da mortalità trascurabile (non più del 10%); Vansickle (1977) ha proposto una modifica del modello che permette di trattare casi con mortalità maggiore, considerando questa come un fenomeno d'attrito.

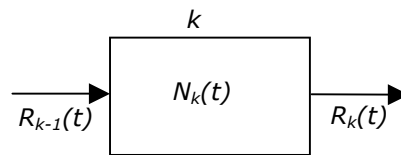


Figura 2. Schema di un sub-stadio del ciclo vitale (a cui si riferisce il Modello a Ritardo Distribuito).

Il Modello a Ritardo Distribuito Invariante nel Tempo (TDD\_TI) è espresso matematicamente dal seguente sistema di equazioni differenziali lineari del primo ordine a coefficienti costanti:

$$\frac{dr_h(t)}{dt} = \frac{H}{DEL} \cdot [r_{h-1}(t) - r_h(t)] \quad (h=1,2,\dots,H)$$

dove  $r_0(t) \equiv R_{k-1}(t)$  ed  $r_H(t) \equiv R_k(t)$  e le rimanenti funzioni  $r_h(t)$  indicano flussi d'uscita d'individui dagli  $H$  sub-stadi 'non osservabili' che costituiscono lo stadio 'osservabile,  $k$  - esimo (Figura 3).

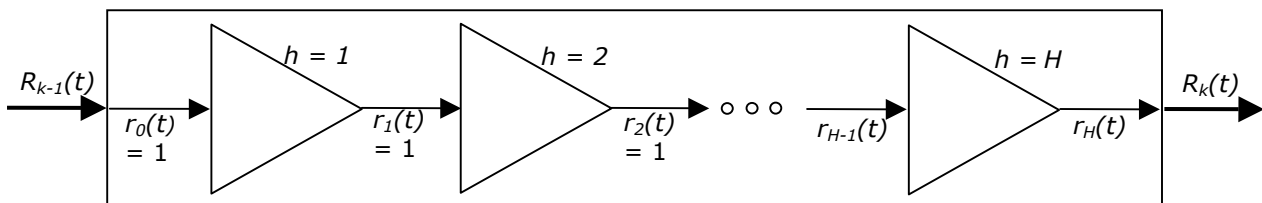


Figura 3. Schema del Modello a Ritardo Distribuito. I triangoli rappresentano i sub-stadi non osservabili del sub-stadio  $k$ -esimo (osservabile) del ciclo vitale.

Se il flusso d'ingresso è rappresentato da una Funzione Delta di Dirac  $r_0(t) \equiv \delta(0)$  la soluzione del sistema si può calcolare analiticamente col metodo ricorsivo e risulta:

$$r_H(t) = \frac{\left(\frac{H}{DEL}\right)^H}{(H-1)!} \cdot e^{-\frac{H}{DEL}t} \cdot t^{H-1}$$

Si tratta di una Distribuzione di Probabilità nota col nome di Distribuzione di Erlang di ordine  $H$ , il cui andamento è mostrato in Figura 4.

Si può dimostrare che  $DEL$  è il valore atteso della funzione soluzione del sistema di equazioni del modello TDD-TI. Un flusso d'ingresso esprimibile tramite una Funzione Delta può rappresentare un impulso di popolazione cioè un insieme d'individui che entrano contemporaneamente nello stesso sub-stadio del ciclo vitale, cioè una coorte. Secondo il modello, gli individui di una coorte che si sviluppa in uno stadio in

condizioni ottimali e a temperatura costante ne escono (maturati) dopo un intervallo di tempo medio *DEL* distribuiti nel tempo secondo la distribuzione di Erlang (Figura 5).

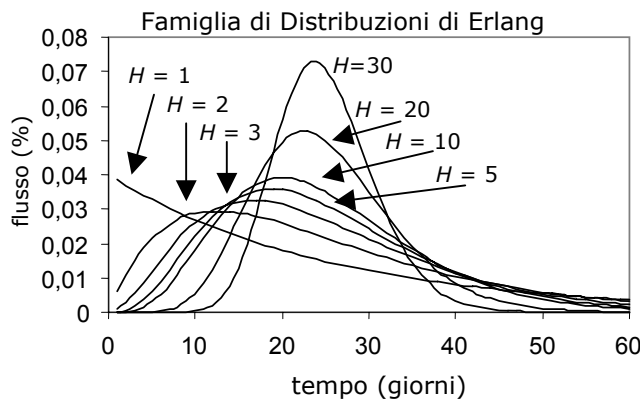


Figura 4. Andamento della Distribuzione di Erlang corrispondente a diversi valori del parametro *H*.



Figura 5. Rappresentazione schematica del funzionamento del Modello a Ritardo Distribuito. Il rettangolo a sinistra indica una coorte in ingresso nel tempo iniziale (Funzione Delta), la curva a destra la distribuzione delle frequenze di maturazione degli individui della stessa coorte (Distribuzione di Erlang), *DEL* il ritardo medio tra ingresso ed uscita.

Per le popolazioni peciloterme in condizioni ottimali il ritardo medio (*DEL* sta per 'Delay') tra ingresso ed uscita da uno stadio del ciclo vitale dipende dalla temperatura:  $DEL = DEL[T]$  e spesso questa dipendenza assume la forma di una iperbole equilatera (Curry and Feldman, 1987)

$$DEL = \frac{S}{T - T_0}$$

I due parametri *S* e *T<sub>0</sub>* possono essere determinati sperimentalmente tramite osservazioni di campo o di laboratorio e sono noti rispettivamente come Fabbisogno Termico e Zero di Sviluppo.

$$r_H(T, t) = \frac{\left[ \frac{H \cdot (T - T_0)}{S} \right]^H}{(H - 1)!} \cdot e^{-\left[ \frac{H \cdot (T - T_0)}{S} \right] \cdot t} \cdot t^{H-1}$$

Questa espressione che dà la distribuzione di frequenza dei tempi di maturazione in funzione della temperatura (costante) è stata da noi formulata nel corso del Primo Anno del P.F. CLIMAGRI. Essa può essere usata per simulare matematicamente l'impatto di un eventuale aumento della temperatura a scala globale sulla dinamica di sviluppo delle popolazioni biologiche peciloterme ed in particolare delle popolazioni zooplanctoniche d'interesse in acquacoltura.

## I MODELLI ANALOGICI

La simulazione analogica dell'impatto dell'aumento della temperatura e dell'irradianza ultravioletta sulla dinamica di sviluppo delle popolazioni zooplanctoniche è stata impostata impiegando due modelli analogici: uno che impiega una Specie dal ciclo vitale lungo (*X. laevis*) e l'altro una dal ciclo breve (*A. franciscana*). I due modelli sono

costituiti da acquari nei quali coorti di individui delle Specie indicate si sviluppano in condizioni controllate.

Le coorti di *X. laevis* sono formate raccogliendo le uova deposte da coppie d'adulti stimolati tramite gonadotropine. Ciascuna coorte, formata da  $N_0 = 100$  uova, viene posta in un acquario di circa 50 litri, al buio, a temperatura costante di  $24.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$  ed alimentata con una dieta a base d'infuso d'ortica. Secondo le 'Normal Tables of *X. laevis*' (Nieuwkoop & Faber, 1956), queste condizioni sono ottimali per lo sviluppo della Specie nei 58 stadi giovanili (embrionali e larvali) che precedono la metamorfosi. A partire dall'ottavo giorno di vita, quando sono già dei girini (larve), gli individui delle coorti vengono osservati giornalmente ad uno ad uno tramite microscopio stereoscopico ed attribuiti ad uno degli stadi definiti nelle 'Tavole'.

Le coorti di *A. franciscana* sono formate a partire da cisti disidratate reperibili sul mercato. Ciascuna coorte, formata da  $N_0 = 1000$  cisti, è posta in un recipiente di circa 2 litri di acqua salata (salinità 5%) a temperatura costante di  $28.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ . A partire da 12 ore dopo l'inizio dell'idratazione delle cisti, gli individui delle coorti sono osservati al microscopio stereoscopico ad intervalli regolari di 12 ore ed attribuiti ai seguenti stadi: cisti ( $k = 1$ ), nauplio ( $k = 2$ ), adulto ( $k = 3$ ).

Nei due modelli, le osservazioni effettuate sulle due Specie sono trattate nello stesso modo. Introdotto un indice

$$j = 0, 1, 2, \dots$$

che indica la successione temporale delle osservazioni, si costruisce una matrice Stadio Frequenza (Manly, 1989)

$$N \equiv N_{j,k}$$

i cui elementi sono dati dal numero d'individui attribuiti allo stadio  $k$ -esimo nella  $j$ -esima osservazione ed un vettore Flusso di Maturazione

$$R \equiv R_j$$

i cui componenti sono dati dal numero d'individui che nell'intervallo di tempo tra la  $j$ -esima osservazione e la precedente hanno raggiunto uno stadio prefissato. Infine lo stadio medio di una coorte nella  $j$ -esima osservazione viene rappresentato tramite la seguente media pesata

$$Q_j = \frac{\sum_k k \cdot N_{j,k}}{\sum_k N_{j,k}}$$

ed il numero degli individui maturati fino alla  $j$ -esima osservazione tramite la sommatoria

$$U_j = \sum_{j=0}^j R_j$$

## **SIMULAZIONI CON *Xenopus laevis***

Nel corso del primo anno il modello analogico dello *X. laevis* è stato impiegato per rivelare l'esistenza di effetti sub-letali della radiazione ultravioletta. Si tratta di effetti che non hanno come conseguenza diretta una mortalità significativa degli individui, ma che producono un danno sulla popolazione a livello ecologico. La ricerca si è articolata in due esperimenti successivi.

Nel primo esperimento sono state formate due coorti che sono state allevate nelle stesse condizioni ottimali. Tuttavia, mentre una è stata esposta alla radiazione ultravioletta di una sorgente artificiale, l'altra è stata mantenuta come controllo. La

sorgente, una lampada fluorescente a bassa pressione (Philips TL 20W/12), produceva sui girini esposti un'irradianza UV-B media di  $1.0 \pm 0.1 \text{ Wm}^{-2}$ ; la durata dell'esposizione giornaliera era di 30 secondi e quindi i girini erano esposti ad una dose di radiazione  $V = 30 \text{ Wm}^{-2}\text{d}^{-1}$ . Il risultato dell'esperimento è stato che i girini esposti si sono sviluppati più lentamente degli altri in tutti gli stadi larvali (Figura 6) ed hanno raggiunto la metamorfosi (senza mortalità o malformazioni apprezzabili) con più di un mese di ritardo rispetto a quelli del controllo (Figura 7). Il secondo esperimento è stato una ripetizione del primo e ne ha confermato il risultato.

Il risultato della simulazione mostra che l'esposizione alla radiazione UV-B può rallentare lo sviluppo degli Anfibi nello stadio larvale, stadio nel quale gli animali sono maggiormente esposti all'azione dei predatori. Questo effetto potrebbe rappresentare un legame tra l'aumento dell'irradianza ultravioletta al livello del mare (conseguenza dell'assottigliamento dello strato d'ozono stratosferico) ed il declino delle popolazioni di Anfibi a scala globale (Houlahan et al., 2000).

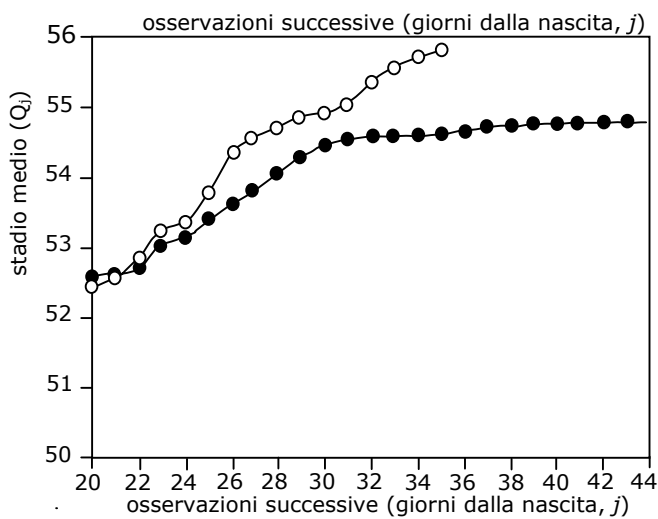


Figura 6. Andamento temporale dello stadio medio  $Q_j$  prima della metamorfosi ( $k = 58$ ) della coorte esposta (curva con cerchi pieni) e di quella di controllo (curva con cerchi vuoti).

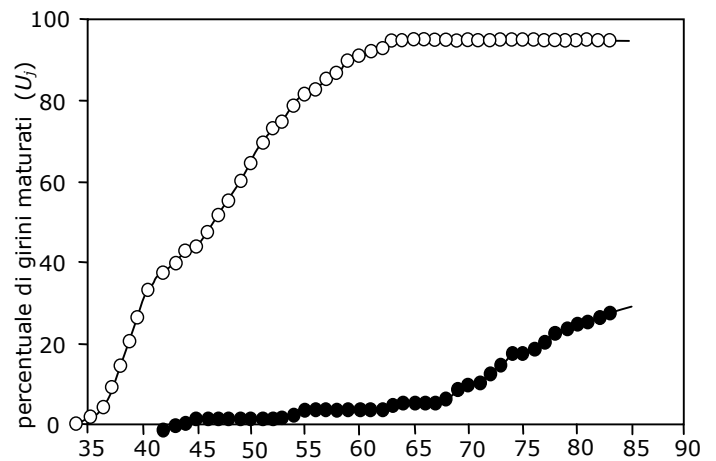


Figura 7. Andamento temporale del numero dei girini che il giorno  $j$  avevano raggiunto la metamorfosi ( $k = 58$ ). La curva con cerchi pieni si riferisce alla coorte esposta e quella con cerchi vuoti alla coorte di controllo.

Sono in corso ricerche per capire se il risultato trovato può essere esteso a popolazioni zooplanctoniche (in particolare ad *A. franciscana*). In caso affermativo, questo suggerirebbe che un eventuale aumento d'irradianza ultravioletta può alterare la stagionalità dello zooplancton negli ecosistemi marini con conseguente alterazione dei cicli ecologici.

## SIMULAZIONI CON *Artemia franciscana*

Il modello di simulazione analogica con *A. franciscana* è stato impiegato per simulare l'effetto della radiazione UV-C sulla distribuzione di frequenza dei tempi di schiusa (maturazione) delle cisti. Le cisti di *Artemia* possono essere trasportate a lunga distanza dal vento e colonizzare ambienti anche molto distanti dal luogo d'origine. Durante il trasporto, esse possono raggiungere quote molto elevate ed essere esposte alla radiazione UV-C (che non raggiunge il livello del mare). Si è voluto verificare se questa radiazione, molto dannosa per la maggior parte degli esseri viventi, lo è anche per le cisti di *Artemia*.

Nella prima simulazione una coorte di cisti è stata esposta alla radiazione ultravioletta di una lampada germicida (lunghezza d'onda  $\lambda = 253.7$  nm, irradianza media  $0.1 \text{ Wm}^{-2}$ , durata dell'esposizione 540 s, dose  $54 \text{ Jm}^{-2}$ ) ed un'altra lasciata come controllo. Dopo l'esposizione, le due coorti sono state poste in due recipienti d'acqua salata nelle stesse condizioni. Nella coorte di controllo si sono schiuse 931 cisti, mentre in quella esposta 738. Il risultato mostra che l'esposizione alla radiazione UV-C ha causato una mortalità leggermente superiore al 20 % e suggerisce che le cisti di *Artemia* sono ben protette rispetto a questa micidiale radiazione. Inoltre, la Figura 8a mostra che la distribuzione delle frequenze dei tempi di schiusa (istogramma) della coorte di controllo è governata dalla distribuzione di Erlang (curva continua, livello significativo del 5%), mentre la Figura 8b mostra che quella della coorte esposta (istogramma) non segue altrettanto bene la stessa distribuzione (curva continua). La perturbazione della distribuzione delle frequenze di schiusa potrebbe essere stata causata dall'esposizione alla radiazione.

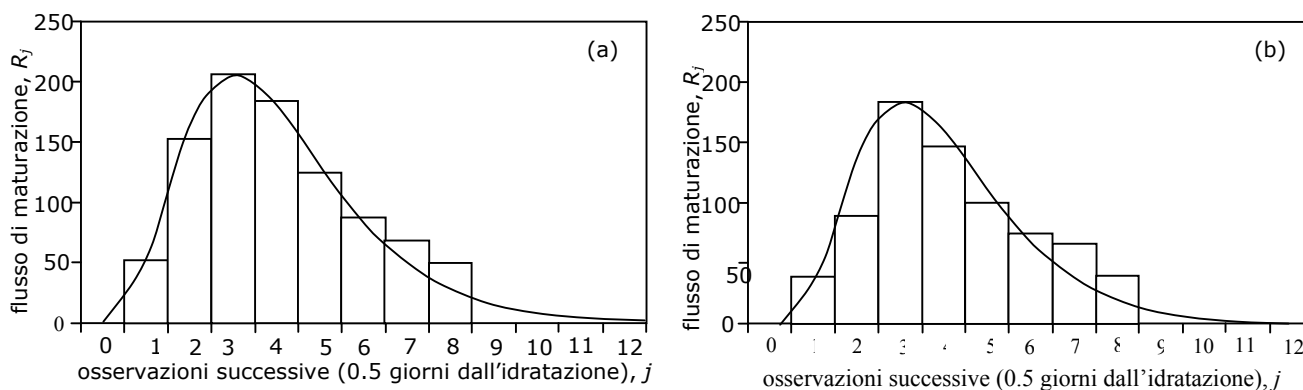


Figura 8. Confronto tra la distribuzione delle frequenze di schiusa delle cisti di *A. franciscana* (istogramma) e la distribuzione di Erlang che meglio si adatta (curva continua), nel caso di una coorte di controllo (a) e di una coorte esposta alla radiazione UV-C prima dell'idratazione.

## MONITORAGGIO E MODELLI DELL'OZONO TOTALE E DELL'IRRADIANZA UV

Una delle principali caratteristiche dei modelli di popolazione presentati è di operare con valori delle variabili forzanti (temperatura e radiazione UV) comparabili con (e spesso inferiori di) quelli in natura. Per questo, a partire dal primo anno, è stato attivato il monitoraggio continuo dell'ozono totale e dell'irradianza ultravioletta integrale e spettrale) su Roma (le nostre ricerche si riferiscono principalmente alle condizioni climatiche dell'Italia Centrale).

Le misure di irradianza spettrale ultravioletta (spettri UV) e di ozono totale (Figura 9) sono state effettuate presso la Stazione di Radiometria Solare (Università di Roma La Sapienza, Dipartimento di Fisica, Dr.ssa A. Siani) tramite uno spettro-fotometro Brewer. Sono stati misurati 10484 spettri UV con una media di 25 spettri per giorno. Nell'arco dell'anno 2001 sono stati rilevati 106 giorni con assenza di nuvolosità e 240 giorni con nuvolosità variabile. Le misure d'irradianza globale sono state effettuate col radiometro a larga banda YESUVB (Figura 10).

Scopo principale delle misure di monitoraggio è la stima dell'ozono totale e dell'irradianza spettrale ultravioletta sulle Lagune Pontine. Infatti, abbiamo in programma di applicare i modelli di simulazione elaborati nell'ambito della nostra U.O alle popolazioni zooplanctoniche di questo ecosistema lagunare (ed in particolare a quelle del Lago di Fogliano). Poiché non è (e non sarà) possibile spostare lo spettrofotometro, abbiamo iniziato una ricerca volta a stabilire in quali condizioni ed in quali limiti le misure effettuate presso la stazione di radiometria solare possono considerarsi rappresentativi per le Lagune Pontine.

Si è cercato di raccogliere il maggior numero possibile di misure microclimatiche effettuate presso le stesse lagune per costruire una climatologia di base del sito e dell'ecosistema in cui si andrà ad operare. In particolare, sono stati analizzati i dati rilevati tra gli anni 1990 e 2001 da una centralina automatica installata sul posto dal Laboratorio di Idrobiologia (MIPAF, Dr. V. Hull). Attraverso il confronto tra le misure di radiazione globale effettuate presso questa stazione e quella di radiometria solare, abbiamo ottenuto una prima stima dell'irradianza UV-B a mezzogiorno sulle Lagune Pontine (Figura 11).

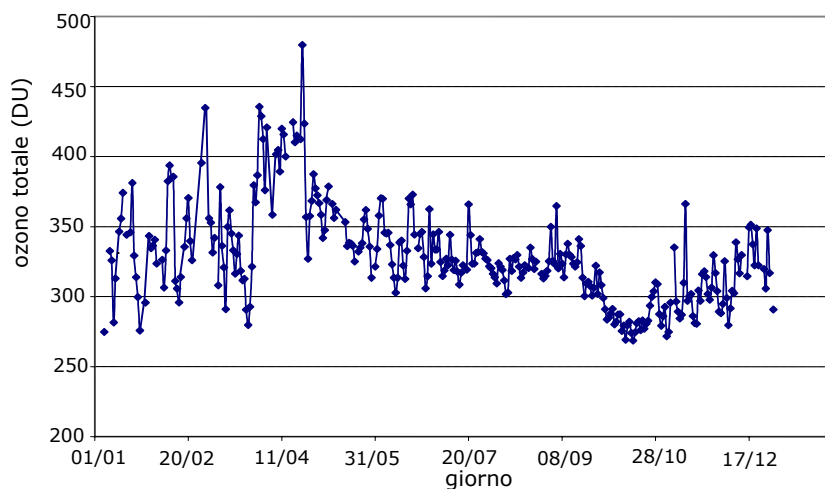


Figura 9. Andamento dell'ozono totale su Roma misurato presso la Stazione di Radiometria Solare nell'anno 2001 (Dr.ssa A.Siani, Dip. Fisica, Università La Sapienza).

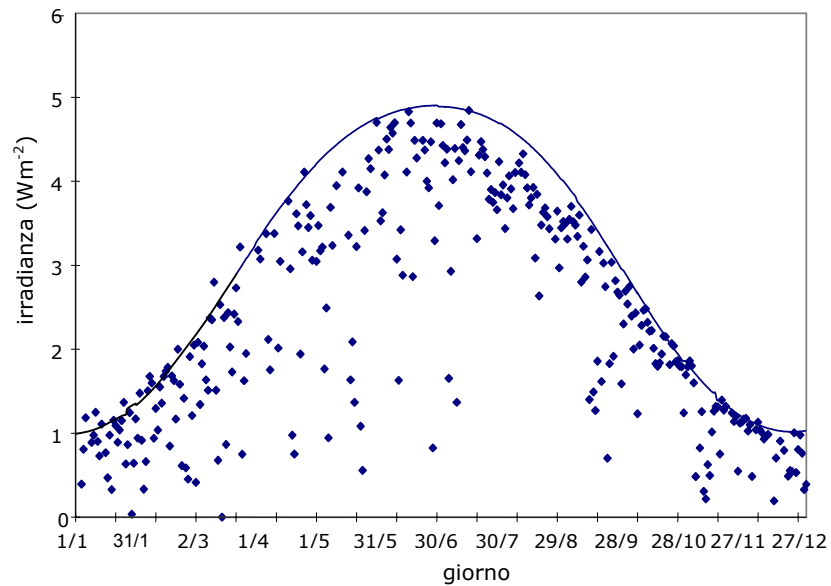


Figura 10. Andamento dell'irradianza ultravioletta a mezzogiorno locale (tra 290 e 325 nm) misurata presso la Stazione di Radiometria Solare nell'anno 2001 (Dr.ssa A.Siani, Dip. Fisica, Università La Sapienza). La curva continua indica il risultato di un modello di simulazione (STAR) della stessa irradianza elaborato presso il Gruppo G-MET (Prof. Palmieri, Dr.ssa Siani).

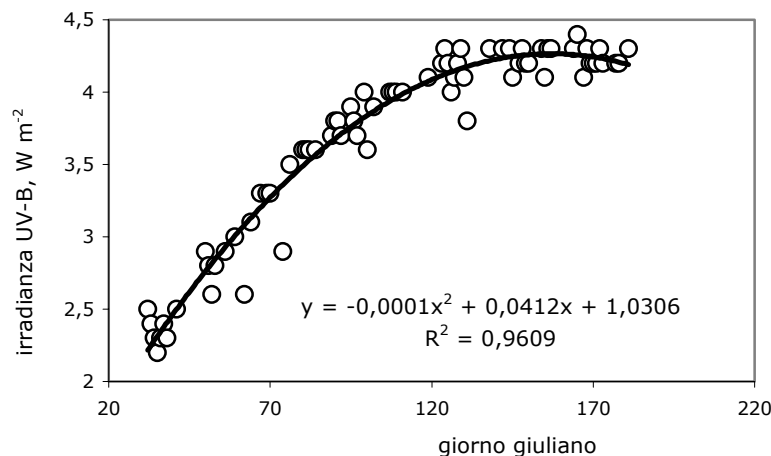


Figura 11. Andamento (stimato) dell'irradianza UV-B sulle Lagune Pontine nei giorni sereni di primavera-estate (quando si ha il massimo sviluppo di zooplancton).

## **STAGIONALITA' DELLE POPOLAZIONI ZOOPLANCTONICHE DEL LAGO DI FOGLIANO.**

Dallo studio dei dati risultanti da ricerche effettuate in passato presso il Lago di Fogliano (Studio delle interrelazioni esistenti tra le popolazioni ittiche e le componenti biotiche ed abiotiche degli ambienti lagunari(1993-1997); Rapporto Finale Dicembre 1997- AGEI S.C.r.l.), si è abbozzato un quadro preliminare delle Specie zooplanctoniche e delle condizioni in cui si effettueranno le campagne di misura per la stima dei parametri e la validazione dei modelli di simulazione.

I campionamenti delle comunità zooplanctoniche del lago di Fogliano effettuati tra il 1994 ed il 1996 (dalla Dr.ssa U. Giorgi) mostrano una presenza notevole di taxa meroplanctonici (organismi planctonici nelle fasi larvali che da adulti divengono

bentonici), mentre tra quelli oloplanctonici si riscontra una netta preponderanza di Copepodi (Tabella 1)

1995	Gennaio			Aprile			Giugno			Ottobre		
	Stazioni	Merop.	Copepodi	Altro	Merop.	Copepodi	Altro	Merop.	Copepodi	Altro	Merop.	Copepodi
2	0,39	0,61		11,12	0,71	3,16	8,14	3,13	0,07	8,34	2,74	0,23
3	1,47	0,34	0,04	76,61	0,48		7,74	4,31	0,32	28,86	5,25	0,14
8	1,64	0,13	0,13	9,84	1,1	9,42	15,71	0,64		107,51	4,46	
9	2,66	0,75	0,04	120	0,52	4,27	60,15	0,79	0,18	10,74	3,96	0,99
12	2,31	0,75	0,04	8,96	0,67	0,14	17,79	0,62		29,13	4,91	
13	1,53	6,33	0,29	44,26	0,67	0,11	78,75	3,02		8,67	3,05	1,85
Totale	10	8,91	0,54	270,8	4,15	17,1	188,28	12,51	0,57	193,25	24,37	3,21

Tabella 1. Distribuzione dei taxa osservati durante quattro campionamenti eseguiti nel 1995 in sei stazioni del Lago di Fogliano. I valori dell'ultima riga indicano il numero di individui per litro, osservati per ciascun taxa nelle sei stazioni (da Studio delle interrelazioni esistenti tra le popolazioni ittiche e le componenti biotiche ed abiotiche degli ambienti lagunari (1993-1997); Rapporto Finale Dicembre 1997- AGEI S.C.r.l.).

Dai dati precedenti risulta un andamento stagionale della densità del meroplancton con un minimo in Inverno e dei Copepodi con un minimo in Primavera. L'andamento stagionale delle popolazioni zooplanctoniche del lago, ipotizzabile sulla base dei dati della tabella precedente, è riportata nella Figura 12.

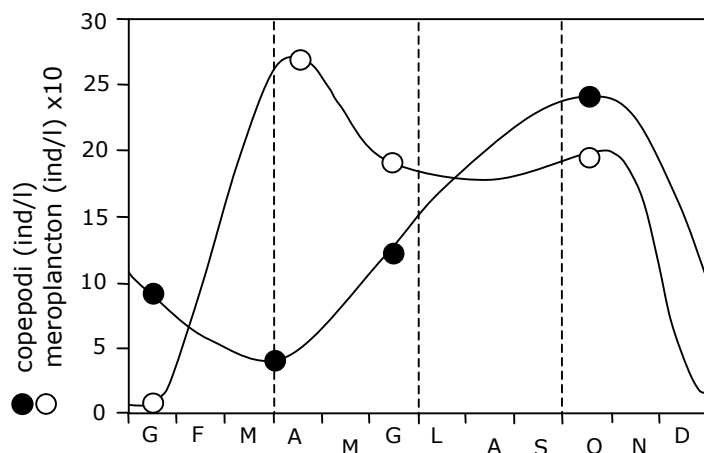


Figura 12. Andamento stagionale del meroplancton e dei Copepodi nel Lago di Fogliano (Liberamente dedotti dalle misure effettuate dalla Dr.ssa U. Giorgi e riportate nel lavoro Studio delle interrelazioni esistenti tra le popolazioni ittiche e le componenti biotiche ed abiotiche degli ambienti lagunari (1993-1997); Rapporto Finale Dicembre 1997- AGEI S.C.r.l.).

## BIBLIOGRAFIA

- AGEI S.C.R.L., 1997 - Studio delle interrelazioni esistenti tra le popolazioni ittiche e le componenti biotiche ed abiotiche degli ambienti lagunari (1993-1997); Rapporto finale Dicembre 1997.
- CURRY G. & FELDMAN R.M., 1987 - Mathematical Foundations of Population Dynamics. Texas A&M Univ. Press.
- HOULAHAN J. E., FINDLAY C. S., SCHMIDT B. R., MEYER A. H., KUZMIN S. L., 2000 - Quantitative evidence for global amphibian population declines. *Nature* 404, pp. 752-755.
- MANETSCH T.J., 1976 - Time-Varying Distributed Delay Models and Their Use in Aggregative Models of Large Systems. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 6: 547-553.
- MANLY B.F., 1989 - A review of methods for the analysis of stage-frequency data. In: Estimation and Analysis of Insect Populations (L. McDonald et al. eds.). Lecture Notes in Statistics, 55, Springer, Berlin, pp. 492.
- NIEUWKOOP P.D., FABER J., 1956 - Normal Tables of *Xenopus laevis* Daudin. North Holland, Amsterdam.
- SEVERINI M. & GILIOLI G., 2002 - Storia e filosofia dei modelli di simulazione nella difesa delle colture agrarie. Atti del Convegno su Modelli Matematici in Agricoltura, Pisa, Maggio 2002 (in stampa). Pubblicazione CLIMAGRI N° 7.
- VANSICKLE J., 1977 - Attrition in Distributed Delay Models. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 7: 635-638.