

AMBIENTE MARINO

MONITORAGGIO AMBIENTALE SU POPOLAZIONI DI *ULVA RIGIDA* DELLA LAGUNA DI VENEZIA

Analisi statistico-ecologica dei dati rilevati

Franco Daniel, Studio tecnico di indagini ecologiche e servizi ambientali, Venezia

PREMESSA

Il problema del massiccio sviluppo di macroalghe nella Laguna di Venezia ha promosso una serie di interventi tesi alla raccolta ed allo smaltimento delle stesse, gestiti in un primo tempo dal Comune di Venezia ed in seguito dal Consorzio Venezia Nuova (CVN). Parallelamente alle operazioni di raccolta algale è stata effettuata una serie di campagne di misura dal CVN allo scopo di permettere la programmazione degli ulteriori interventi.

Parte dei dati raccolti sono stati utilizzati per l'implementazione di un modello trofico-diffusivo della laguna di Venezia in elaborazione presso la Sezione di Fisica Chimica Ambientale del Dipartimento di Chimica Fisica dell'Università di Venezia (Dejak C. *et al.*, 1989). Il presente articolo tratta brevemente del particolare approccio analitico, indicato come "osservativo" (Ludwig & Reynolds, 1988), che risulta necessario per una analisi statistico-ecologica di dati ottenuti da campagne di monitoraggio. Tale approccio elabora infatti, con tecniche di statistica, multivariata o meno, misure ottenute *a priori* o *a posteriori* in condizioni imposte dal sistema stesso: l'informazione che ne deriva è il risultato dell'interazione di molte variabili sulle quali non è possibile un controllo.

Sono stati analizzati in questo modo parte dei risultati delle campagne di monitoraggio svolte dal CVN allo scopo di:

- a) definire le caratteristiche strutturali e/o funzionali della comunità macroalgale della Laguna di Venezia;
- b) dare una interpretazione ecologicamente consistente alle caratteristiche descritte;

c) analizzare le relazioni tra fattori ecologici e strutture/funzioni individuate;

d) fornire strumenti interpretativi e predittivi sulla mortalità ed i decrementi delle popolazioni in esame.

ANALISI PRELIMINARE

Per procedere nella ricerca le singole variabili sono state sottoposte ad una analisi preliminare, necessaria per l'applicazione dei metodi statistici sopra detti, che si basano su di una serie di caratteristiche dei dati trattati: se tali presupposti vengono a mancare il risultato complessivo dell'indagine statistica è insignificante, e l'utilizzo delle conclusioni derivanti può portare ad errori di giudizio. Tale analisi ha portato al non utilizzo di alcune tra le misure effettuate.

MATERIALI E METODI

I sistemi statistici di analisi multivariata utilizzati sono quelli di *classificazione* ed *ordinamento*: lo scopo della *classificazione* consiste nell'inserimento di unità di campionamento (qui rappresentate da stazioni di prelievo, S) in gruppi omogenei, mentre lo scopo dell'*ordinamento* consiste nell'ordinare le unità di campionamento entro un sistema di assi per identificare *patterns* di similarità, cercando di far emergere relazioni ecologiche.

Tali metodi possono essere applicati sia secondo lo spazio che secondo il tempo (Legendre & Legendre, 1983; Legendre *et al.*, 1985): visti gli obiettivi della ricerca è risultata opportuna questa seconda ipotesi, ma per poter classificare e/o ordinare i dati in funzione del tempo, è necessario che questi risultino contemporanei ed equispaziati. Dato che le stazioni di prelievo erano visitate con frequenza circa settimanale, è risultato

necessario regolarizzare i dati a disposizione, ottenendo in questo modo anche la diminuzione della loro variabilità intrinseca.

Sia per la classificazione che per l'ordinamento dei dati le tecniche sono numerose ed ogni sistema di analisi adottato può portare a risultati diversi, perchè diversi sono i presupposti di impiego delle operazioni computazionali svolte. I risultati sono spesso ambigui e devono essere quindi utilizzati in "ipotesi conservativa" nonchè possedere sempre un chiaro significato ecologico.

I fattori ecologici che determinano i risultati delle operazioni di classificazione ed ordinamento dei fattori biotici non entrano propriamente a far parte del tipo di analisi sopra detto, infatti i risultati delle tecniche, sempre se applicabili, che permettono analisi contemporanee di variabili biotiche ed abiotiche (e.g. analisi correlazione canonica) portano generalmente a risultati di difficile interpretazione.

Nel caso in esame per identificare le relazioni funzionali tra mortalità macroalgale e variabili abiotiche si è proceduto, dopo una prima indagine sulle correlazioni semplici e parziali, alla stima di modelli di regressione lineare.

Le misure utilizzate sono riportate in tabella 1. I dati sono stati elaborati statisticamente e graficamente mediante i seguenti pacchetti: SURFER®, STATGRAPHICS®, SYSTAT®, TIMESERIES1.

RISULTATI

Definizione delle caratteristiche strutturali e/o funzionali delle popolazioni in esame

Classificazione

La tecnica in questo caso utilizzata è stata la *cluster analysis*. I risultati si sono

concretizzati in un dendrogramma con tre ipotesi di raggruppamento delle stazioni considerando la variabile BIO (cfr. Tab. 1), e in un dendrogramma con due ipotesi di raggruppamento considerando la variabile INC, da sottoporre ad indagine interpretativa (Fig. 1).

I raggruppamenti ottenuti con i dati di densità di biomassa non sono risultati coincidenti con quelli ottenuti dai dati di variazione incrementale. Gli andamenti di densità macroalgale e variazione incrementale nel tempo per i vari gruppi di stazioni sono risultati irregolari, caratterizzati da rapide ed anche cospicue variazioni nel periodo primaverile-estivo, e da variazioni minori nel periodo invernale.

Interpretazione della classificazione

I risultati della classificazione sono stati sottoposti ad adeguata interpretazione e verifica. Il metodo applicato è stato la *analisi multipla discriminante* (MDA), che permette di determinare:

- la significatività della differenza simultanea tra più fattori nei gruppi ottenuti;
- la "distanza" multivariata tra i centri dei vari gruppi;
- il maggiore o minore peso dei singoli fattori nel determinare tale distanza;
- il possibile inserimento di una nuova unità di campionamento in uno dei gruppi individuati.

I fattori ecologici la cui combinazione lineare è riuscita a spiegare la massima diversità significativa tra i gruppi di fattori biotici ottenuti dalla *cluster analysis* sono stati (in ordine di peso) **FT**, **PROF**, un indice del potenziale redox del sedimento non superficiale e **TEMP** (Tab. 2). Tali fattori hanno identificato 9 gruppi di stazioni (II ipotesi di raggruppamento) con diversi andamenti di biomassa.

Tali fattori sono alcuni tra quelli caratteristici del parametro "confinamento" (**FT**, **PROF**), che definisce le caratteristiche strutturali delle comunità biotiche in ambiente paralico (Gueloget & Perthuisot, 1983), e quelli che caratterizzano complessivamente l'ambiente lagunare (inteso nella accezione corrente in ecologia), ovvero le variazioni del potenziale redox nel sedimento e quelle di temperatura che le influenzano (tali considerazioni sono in realtà strettamente connesse alle indagini svolte sulle sole variabili fisiche, che saranno riportate in una nota futura).

Inoltre le stazioni si sono potute raggruppare in relazione agli andamenti della densità macroalgale e non alla loro variazione incrementale. Questo indica che le variazioni incrementali non sembrano poter individuare popolazioni funzionalmente diverse, per la notevole irregolarità nella dinamica di popolazione che può essere imputabile al verificarsi

Tabella 1 - Misure con le rispettive unità, effettuate dal CVN sulla biomassa macroalgale e sui fattori abiotici durante parte delle campagne 1990 e 1991.

Misure delle Macroalghe		Descrizione
Nome variabile	Unità di misura	
BIO	Kg/m ³	densità macroalgale
INC	kg/m ³ /giorno	variazione incrementale di biomassa
Misure dei fattori ecologici		Descrizione
Nome variabile	Unità di misura	
PROF	m	Profondità rilevata durante il campionamento
RED1	mV	potenziale redox (Eh) dello strato superficiale di fondale
RED5	mV	potenziale redox a 5 centimetri di profondità
INV	m	misura della profondità di inversione di segno del potenziale redox
SAL	%	misura della salinità
TEMP	C°	misura della temperatura della colonna d'acqua
FT		misura di un fattore di turbolenza, stimato da simulazioni modellistiche ed espresso dal rapporto tra energia specifica di un determinato punto lagunare e quella calcolata in un punto rappresentativo dell'energia idrodinamica entrante nel sistema, durante un ciclo mareale

Tabella 2 - Risultati MDA in base al raggruppamento definitivo. Sono riportati, per ogni funzione, gli autovalori, la varianza percentuale spiegata da ognuno, i coefficienti di correlazione canonica, le statistiche multivariate ed il livello di significatività corrispondente.

Funzione discrim.	Auto-valore	Perc. Relat.	Correl. Canonica	Funzioni Derivate	Wilks Lambda	Chi 2	Gr. lib.	Liv. sign.
1	.697	82.7	66	0	.506	308000	32	.0000
2	.092	9.73	28	1	.859	68.767	21	.0000
3	.051	5.99	22	2	.937	29.089	12	.00382
4	.014	1.70	11	3	.985	6.514	5	.25929

si di eventi catastrofici di mortalità, innescati da condizioni fisiche particolari ma strettamente densità-dipendenti.

Tale classificazione ha permesso dunque uno studio comparato delle risposte biologiche in ambienti diversi, caratterizzati in primo luogo dalle possibilità di ricambio idrico (Fig. 2).

Ordinamento

Tra i vari sistemi di ordinamento la PCA

(*Principal Component Analysis*) è stato ritenuto la più facilmente interpretabile (Tab. 3). A questa analisi è stata associata una metodica non parametrica, l'*ordinamento multidimensionale nonmetrico* (NMDS).

Interpretazione dell'ordinamento

La strategia adottata è consistita nell'utilizzare le coordinate delle stazioni ottenute dall'ordinamento e nell'inserirle in

modelli di regressione rispetto ai fattori ecologici rilevati nelle stesse stazioni. Il modello di regressione utilizzato è stato quello multiplo, consigliabile in questo tipo di indagini ecologiche (Ludvig & Reynolds, 1988).

Per quanto riguarda i dati di densità macroalgale circa l'80% della variabilità complessiva dei dati è spiegata dalle prime due componenti.

Entrambi i gradienti considerati, ovvero le coordinate delle prime due componenti, sono significativamente predetti dalla variabile **FT**, che fornisce un indice del ricambio idrico del sistema (Tab. 4). È stato definito in questo modo il ruolo primario del "confinamento", nella produzione delle popolazioni algali della Laguna di Venezia, non più in via ipotetica ma in base a valutazioni tratte da modelli statistici confrontabili. Tale risultato è inoltre concorde, anche per la disposizione lungo il gradiente ottenuto, con le analisi di classificazione.

Nel caso della variabile **INC**, i risultati sono stati meno chiari. La prima componente, che può essere interpretata come variazione stagionale degli incrementi, è predetta, peraltro non significativamente, solo dallo stato di ossidazione del sedimento non superficiale. Tale ipotesi è confermata dalla regressione parzialmente significativa della seconda componente con le variabili **INV** e **RED5**, entrambe con coefficiente negativo. Nel caso delle variabili coinvolte, si può ritenere che le condizioni di crescente riduzione del sedimento siano causa e non effetto dei decrementi di biomassa. Le cause (densità-dipendenti) dei crolli catastrofici di popolazione, che rendono irregolari e non confrontabili gli andamenti di variazione incrementale nelle diverse stazioni, sono legate a risorse rese indisponibili in tempi brevi o brevissimi.

Modelli interpretativi e predittivi della mortalità macroalgale

Correlazioni

In estrema sintesi, dalla matrice di correlazione dell'intero set di dati sono state confermate le fondamentali relazioni lineari ipotizzabili tra *standing crop*, variazioni incrementali e variabili fisiche rilevate. Gli incrementi sono risultati significativamente correlati solo con la biomassa, cosa che si accorda ai risultati delle analisi precedenti (Tab. 5).

La correlazione parziale ha indicato inoltre come la relazione tra biomassa e redox del sedimento sia significativa per quanto riguarda lo straterello superficiale di sedimento, ma diminuisca drasticamente all'aumentare della profondità. Il sistema sedimento infatti è tamponato e risponde in maniera diversificata e ritardata alle modificazioni superficiali.

Figura 1 - Dendrogramma relativo alla variabile BIO: le tre ipotesi di raggruppamento sono indicate da I, II e III; il raggruppamento definitivo, numerato con cifre arabe, è risultato essere l'ipotesi II. S sta per stazione.

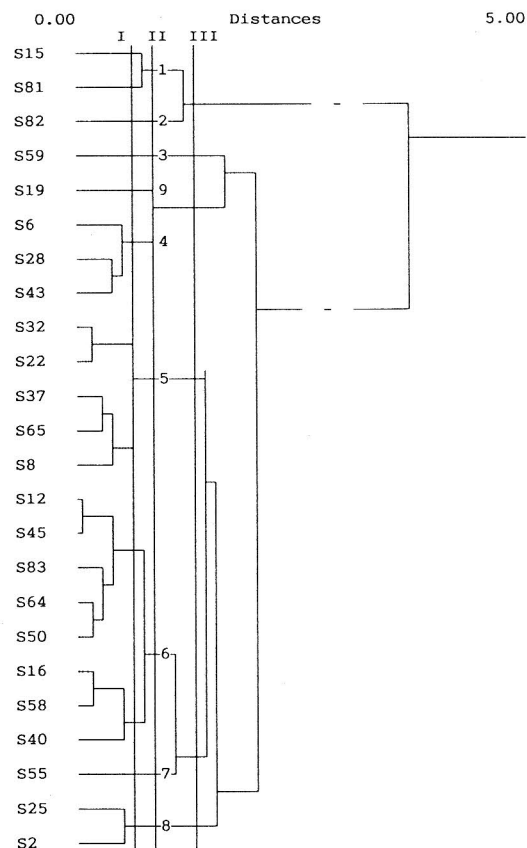
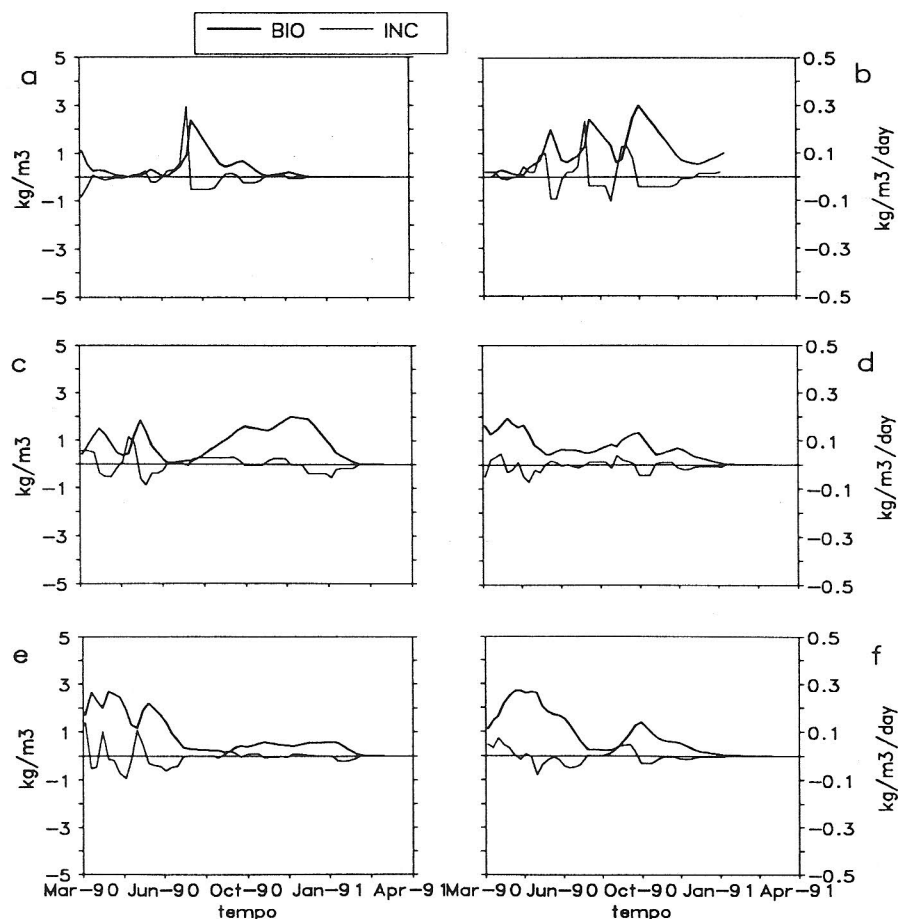


Figura 2 - Si riportano i grafici relativi agli andamenti delle variabili BIO ed INC dei primi 6 raggruppamenti definitivi ottenuti dalla analisi di classificazione: a) Gruppo 1, b) Gruppo 2, c) Gruppo 3, d) Gruppo 4, e) Gruppo 5, f) Gruppo 6.



Regressioni semplici e multiple

Si è proceduto in seguito alla valutazione della mortalità mediante modelli di regressione lineare semplice, non essendo ragionevole indagare sulle funzioni mediante le quali stimare modelli non lineari.

Comprendendo i dati di tutti i gruppi i modelli di regressione lineare sono risultati significativi utilizzando come regressori **BIO** e **RED1**, meno significativi con **PROF** ed **FT**.

All'interno dei vari gruppi i modelli di regressione stimati sono concordi, per quanto riguarda **BIO**, a quelli dell'intero set di dati (con l'esclusione di due gruppi).

Quindi, sia su tutti i dati che all'interno di ciascun gruppo, sono stati stimati i modelli di regressione multipla, che rispondono generalmente con maggiore realismo alle interazioni ecologiche, valutando l'azione di più variabili indipendenti contemporaneamente. I modelli di regressione sono risultati più significativi in seguito a trasformazione logaritmica dei valori di biomassa e variazione incrementale.

Il modello finale di regressione (Tab. 6) stimato per l'intero insieme di dati comprende le variabili **BIO**, **RED1** ed **FT**.

L'analisi della varianza del modello ha dato risultati altamente significativi, il valore di R^2 , aggiustato è di circa 0,5, e definito per circa il 90% dalla variabile **BIO**. Le varie diagnostiche grafiche per la verifica del modello lo indicano come accettabile.

Non è possibile, per ragioni di spazio, analizzare le regressioni svolte per ogni gruppo di stazioni individuate dalla MDA, argomento di una nota in corso di stesura.

Interpretazione delle regressioni

I modelli di regressione, sia semplice che multipla, confermano l'ipotesi che vede i decrementi dell'intera comunità macroalgale determinati essenzialmente (in base alle variabili rilevate, s'intende) da un aumento della densità di popolazione, in concomitanza ad una diminuzione del ricambio idrico e ad un aumento della riduzione del sedimento superficiale (e.g. dello stato anossico). La potenza predittiva delle variabili fisiche prese singolarmente è risultata assai bassa; **RED1**, che risulta la più efficace, è considerabile più una conseguenza dei decrementi che una causa di questi.

La diminuzione dello stato di ossidazione dello strato superficiale di sedimento deriva infatti da un aumento dell'attività decompositiva innescata a sua volta, dall'aumento della densità di popolazione; che poi questo generi a sua volta un

Tabella 3 - Valori di varianza, cumulativa e percentuale, spiegata dalle prime quattro componenti principali, ottenuti sottoponendo ad analisi PCA la variabile **BIO** (a) e la variabile **INC** (b).

a) Numero componente	Perc. di varianza	Perc. cumul.
1	48.18451	48.18451
2	12.84817	61.03268
3	9.78936	70.82204
4	7.62464	78.44668
b) Numero componente	Perc. di varianza	Perc. Cumul.
1	15.63298	15.63298
2	15.36232	30.99529
3	13.23198	44.22727
4	11.45466	55.68193

Tabella 4 - Risultati e principali statistiche del modello di regressione finale messo a punto per la prima componente principale della variabile **BIO**.

Variable indep.	Coefficienti	Err. stand.	Valore-t	Liv. sign.
Costante	1.203239	0.182917	6.5780	0.0000
FT	-0.421709	0.104808	-4.0236	0.0006
R2 (Agg.) = 0.3977	Err. stand = 0.324141	Err. med.ass. = 0.262087	DurbWat = 1.920	
Prima: 0.0000	0.000000	0.000000	0.000	

24 osservazioni interpolate, previsioni calcolate per 0 valori assenti della var. dip.

aumento della mortalità è assai probabile. Tale risultato concorda con l'interpretazione dell'ordinamento.

All'interno di ogni gruppo i meccanismi sono più complessi, tant'è che in alcuni casi nessuna variabile è in grado, singolarmente, di spiegare l'andamento dei decrementi di biomassa.

Conclusioni

Le analisi svolte hanno permesso di delineare un quadro generale delle caratteristiche di popolazione di *U. rigida* nella laguna di Venezia, e di individuare una serie di ambienti lagunari definibili mediante parametri fisici, in cui i comportamenti delle popolazioni di *Ulva* risultano diversi.

In tale quadro si è riscontrato che:

a) il ricambio idrico, o più in generale il "confinamento", gioca un ruolo primario

nella produzione delle popolazioni algali,

b) le variazioni incrementali di biomassa sono solo secondariamente determinate dalle caratteristiche ambientali delle stazioni, mentre sono fondamentalmente densità-dipendenti. Le cause (densità-dipendenti) dei crolli catastrofici di popolazione sono piuttosto effetto di modificazioni ambientali e legate a risorse rese indisponibili in tempi brevi o brevissimi.

Si sono infine ricavate una serie di leggi empiriche di mortalità che legano la densità macroalgale alle variabili fisiche, e la relazione generale di mortalità appare modificata in situazioni ambientali diverse.

In altri termini si sono identificati, in base alle variabili rilevate, i rapporti tra statistiche caratteristiche stazionali, produzione macroalgale e mortalità.

Riguardo i dati analizzati è emerso che la variabilità delle misurazioni di biomassa aumenta con la profondità della stazione. Il fatto poi che le rilevazioni disponibili coprivano un ciclo stagionale e mezzo, ha portato inevitabilmente ad una sovra e/o sotto-stima di alcune misure, biotiche (e.g. densità macroalgale) e non (e.g. potenziale redox del sedimento), legate naturalmente ad andamenti stagionali. Inoltre la variabile FT si è potuta esprimere solo qualitativamente, e questo ha abbassato la potenza analitica e predittiva dei modelli statistici utilizzati.

Ciò nonostante si è dimostrata la possibilità di prevedere, con margini di errore stimabili, la localizzazione, la priorità ed i tempi di raccolta macroalgale, operazione a tutt'oggi non sviluppata.

Bibliografia

BARNES D.J., DEVEREUX M.J., 1984

Productivity and calcification on a coral reef: a survey using pH and oxygen electrode techniques

J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 79:213-231

DEJAK C., FRANCO D., PASTRES R., PECENIK G., 1989

A 3D eutrophication-diffusion model of the Venice Lagoon: some applications In: Physics of shallow estuaries and bays

T. Cheng (ed.) Springer Verlag (in press)

GUELORGET O., PERTHUISOT J.P., 1982

Structure et évolution des peuplements benthiques en milieu paraliq. Comparaison entre un modèle dessalé (l'Etang du Prevost, France) et un modélé sursalé (Bohret el Bibon, Tunisie). Conséquences biologiques et geologique

Journ. rech. Océanogr. 7:2-11

LEGENBRE L., LEGENBRE P., 1983

Numerical Ecology

Elsevier, New York

LEGENBRE P., DALLOT S., LEGENBRE L., 1985

Succession of species within a community: Chronological clustering, with applications to marine and freshwater zooplankton

American Naturalist 125:257-258

LUDWIG J.A., REYNOLDS J.F., 1988

Statistical Ecology

J. Wiley & Sons, Inc.

Tabella 5 - Matrice di correlazione lineare delle variabili PROF, SAL TEMP, FT, RED1, RED5, INV, BIO e INC. Sono riportati i coefficienti di correlazione ed i livelli di probabilità; l'entità numerica della matrice è di 420 osservazioni.

	PROF	SAL	TEMP	FT	RED1	RED5	INV	BIO	INCR
PROF	1.00 .000	-.015 .752	-.021 .657	.072 .138	.047 .334	-.010 .823	-.008 .861	-.076 .118	.060 .219
SAL	-.015 .752	1.000 .000	.006 .897	-.082 .092	.072 .138	.183 .000	.0734 .133	.014 .766	-.016 .739
TEMP	-.021 .657	.006 .897	1.000 .000	-.075 .123	-.121 .013	-.607 .0000	-.578 .000	.1506 .002	.0079 .871
FT	.072 .138	-.082 .092	-.075 .123	1.000 .000	-.007 .876	.095 .051	0.39 .425	-.079 .102	.0564 .248
RED1	0.47 .334	0.72 .138	-.121 .013	-.007 .876	1.000 .000	.126 .009	.108 .026	-.233 .000	.006 .902
RED5	-.010 .823	.183 .000	-.607 .000	.095 .051	.126 .009	1.000 .000	.543 .000	-.166 .000	.065 .178
INV	-.008 .861	.073 .133	-.578 .000	.039 .425	.108 .026	.543 .000	1.000 .000	-.093 .056	.044 .368
BIO	-.076 .118	.014 .766	.150 .002	-.079 .102	-.233 .000	-.166 .000	-.093 .056	1.000 .000	-.406 .000
INC	.060 .219	-.016 .739	.007 .871	.056 .248	.006 .902	.065 .178	.044 .368	-.406 .000	1.000 .000

Tabella 6 - Risultati del modello di regressione multipla messo a punto per l'intero gruppo di dati. Sono riportate le principali statistiche

Variabile indep.	Coefficienti	Err. stand.	Valore-t	Liv. sig.
COSTANTE	-2.791164	0.205486	-13.5832	0.0000
BIO	0.95	0.056289	12.9622	0.0000
RED1	-0.001058	0.000333	-3.1808	0.0017
FT	-0.242331	0.106108	-2.2838	0.0235
R2 (Agg.) =	0.5174	Err. stand = 0.892786	Err. med.ass. = 0.661977	DurbWat = 2.061
Prima:	0.6581	0.897692	0.657919	2.091

193 osservazioni interpolate, previsioni calcolate per 122 valori assenti della var. dip.