

CARACTERITZACIÓ FÍSICO-QUÍMICA DELS TRAVERTINS EN FORMACIÓ DE L'ESTANY DE BANYOLES

M. V. Coma, C. A. Abella i O. Oromí

Institut d'Ecologia Aquàtica. Estudi General de Girona (UAB). Hospital, 6. 17071-Girona.

RESUM

En aquest treball es presenten els resultats de l'estudi dels paràmetres que permeten explicar la distribució en l'espai del travertins en formació de l'estany de Banyoles.

Es presenta l'hipòtesi de la importància de l'efecte de la força dels corrents i de les onades en aquells llocs on la seva distància de recorregut sobre la superfície de l'aigua és major. Els blocs travertínics del Sud de l'estany s'adapten als corrents superficials esmentats, que en aquesta zona prenen la direcció dels vents més freqüents que afecten l'estany de Banyoles, els quals procedeixen del nord (tramuntana). Una distància de recorregut de les ones molt llarga fa que la seva força moduli la direcció de creixement dels travertins en formació, que es troben a poca fondària, pel fet que erosionen el creixement normal en altres direccions. Així doncs, s'ha pogut comprovar que els blocs travertínics creixen de forma pràcticament perpendiculars a la línia de costa en la zona Marimon (sud de l'estany) i paral·les a la costa en la zona del Cap de Bou (est de l'estany).

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados del estudio de los parámetros que permiten explicar la distribución en el espacio de los travertinos en formación del lago de Banyoles.

Se presenta la hipótesis de la importancia del efecto de la fuerza de las corrientes y de las olas en las zonas donde su recorrido sobre la superficie del agua es mayor. Los bloques travertínicos del Sur del lago se adaptan a las corrientes superficiales mencionadas, que en esta zona toman la dirección de los vientos más frecuentes que afectan al lago de Banyoles que son vientos procedentes del norte (tramuntana). Una larga distancia de recorrido hace que su fuerza module la dirección de crecimiento de los travertinos en formación, que se encuentran a poca profundidad, debido a que erosionan el crecimiento normal en otras direcciones. Así pues, se ha podido comprobar que los bloques travertínicos crecen de forma prácticamente perpendicular a la línea de costa en la zona Marimon (sur del lago) y paralelos a la costa en la zona de Cap de Bou (este del lago).

ABSTRACT

In this work the results of the study of physical parameters which explain the distribution in the space of active travertines are shown. It has been possible to determine the importance of waves effect in those places where the run distance of waves over the water surface is greater due to the winds which blow stronger in Banyoles area: the northern ones. If

the run distance is greater, waves break against active travertines, which are found in shallow areas. Therefore, travertines grow perpendicularly to shoreline in southern areas and parallelly in east central areas.

Key words: cyanobacteria, Banyoles lake, physicochemical parameters, present travertines, wind stress.

INTRODUCCIÓ

Un cop realitzada la cartografia dels travertins en formació de l'estany de Banyoles (Coma et al. 1987) calia estudiar els paràmetres físico-químics per tal d'explicar la seva distribució a l'entorn de l'estany.

La precipitació de CaCO_3 lligat al procés biològic de travertinització és un procés descrit per diferents autors (Julià, 1980, Casanova, 1980, 1981). L'estudi dels travertins de l'estany de Banyoles s'encetà amb els treballs de Julià (1980) i Abella (1986) on es proposa una aproximació al model biològic de creixement. Julià et al. (1987) defineixen com a dic travertínic, aquestes estructures, des d'un punt de vista geològic, en funció de la seva posició respecte de l'estany, sense estudiar-ne les característiques biològiques.

Les característiques càrstiques de l'estany de Banyoles permeten comparar els blocs travertínics amb els *algal bioherms* del Fayetteville Green Lake de Nova York (Brunskill, 1969) o formacions en barrera de la zona de Dragignan, França (Casanova, 1982). Formacions estromatolítiques similars es troben freqüentment en condicions marines, les quals generalment són en aigües tropicals, amb la qual cosa el seu creixement es veu afavorit. Un fet similar succeeix amb les formacions d'aigües termals.

MATERIAL I MÈTODES

S'han enumerat un total de 495 blocs travertínics seleccionats per tenir el mínim diàmetre, major de 20 cm. S'han considerat les mateixes 7 àrees de presència activa de travertins que a Coma et al. (1988), les àrees IV, V, i VII han estat subdividides en 20 subàrees, d'acord amb l'orientació que prenien la costa (Fig. 1 i taula 1). Així, l'àrea IV ha estat dividida en 9 subàrees, que corresponen en la seva zona central de un conjunt de blocs alterats per la construcció de la mota o dic artificial que limita l'estany i en els seus extrems a blocs molt aïllats i també, en part, destruïts per la mateixa causa. L'àrea V ha estat dividida en 5 subàrees i l'àrea VII en 6, segons els criteris exposats en funció de l'orientació de la línia de costa. Sobre aquests blocs individualitzats s'han realitzat les mesures d'orientació, distància a la costa, fondària i superfície.

L'orientació dels blocs travertínics ha estat mesurada amb una brúixola i s'han mesurat els angles així com la desviació respecte a l'eix nord-sud, de ma-

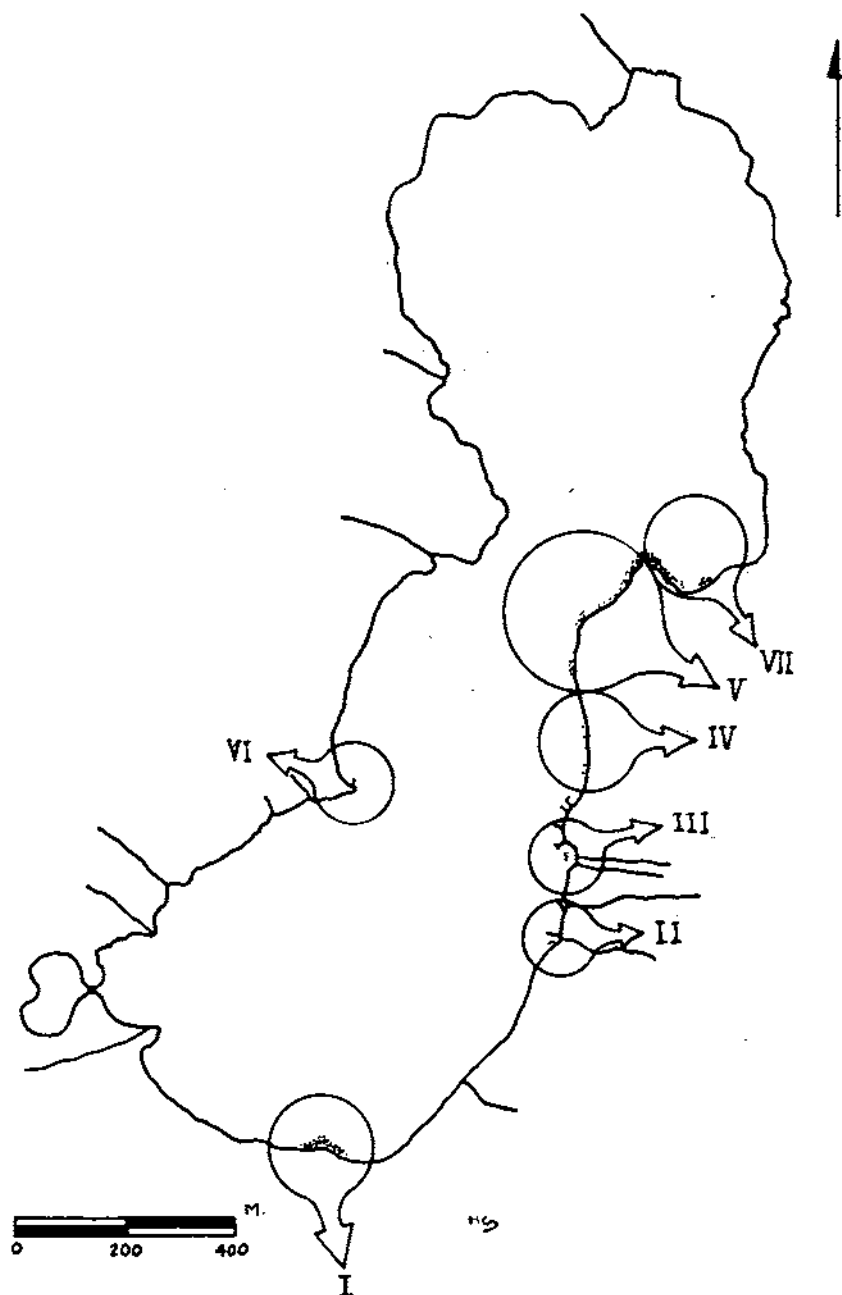


Figura 1. Disposició de les diferents àrees que s'han establert al llarg de les zones amb presència de travertins actius. De les àrees indicades s'han subdividit en subàrees segons la taula 2 en funció de l'orientació de la línia de costa.

Taula 1. Valors mitjans de les orientacions en graus respecte al nord, de la línia de costa i dels travertins de les diferents subàrees procedents de les àrees descrites a la figura 1. Aquestes subàrees han estat definides en funció de l'orientació de la línia de costa. Així, quan aquesta varia, es defineix una nova subàrea.

Àrea	Subàrea	Or. Costa*	Or. Subzona*
I		144	20
II		15	32
III		3	41
IV	1	22	28
	2	2	52
	3	25	23
	4	39	32
	5	42	38
	6	5	6
	7	130	48
	8	165	51
	9	117	16
V	10	55	59
	11	28	90
	12	26,78 **	93
	13	56	50
	14	42,105**	93,76**
VII	15	113	68
	16	125	69
	17	138	74
	18	137	80
	19	35	53
	20	38	58

* En graus respecte al nord.

** En aquest cas, la línia de costa té dues orientacions.

nera que els valors resultants són dins l'interval 1-180 graus, i reserva el valor zero pels blocs arrodonits sense orientació aparent. La distància a la costa ha estat mesurada amb una cinta mètrica *in situ* i verificada amb la cartografia esmentada. Es va considerar la distància mínima entre el punt central del bloc de travertí i la riba. La fondària s'ha mesurat de la mateixa manera, amb uns pesos a l'extrem de la cinta. En cas d'irregularitats en la superfície del mateix travertí es va apuntar la mitjana de 3 mesures de fondària. La superfície s'ha mesurat també *in situ* considerant com a rectangulars els blocs, és a dir, les mesures d'amplada i longitud, que resulten de fer les mitjanes dels seus gruixos menors i majors. La temperatura, en dècimes de grau, fou mesurada amb un termistor de camp de sortida digital.

Les observacions al microscopi s'han realitzat amb contrast de fases i 1000X. L'anàlisi de pigments es va fer segons el mètode de Takahashi & Ichimura (1968), després de prospeccionar amb un cilindre buit d'1 cm de diàmetre i 20 cm de profunditat. Posteriorment es tallava en seccions en funció de l'observació visual de les diferents capes.

RESULTATS

A la taula 2 es poden observar les fondàries, distàncies a la costa i superfícies mitjanes de les diferents àrees juntament amb les seves desviacions típiques. A la taula 1 es poden veure les orientacions de la seva línia de costa.

La figura 2 correspon a la distribució de les superfícies dels blocs travertínics al llarg d'un trajecte mesurat *in situ* respecte a la distància de la costa en

TRANSECTE SUPERFÍCIES

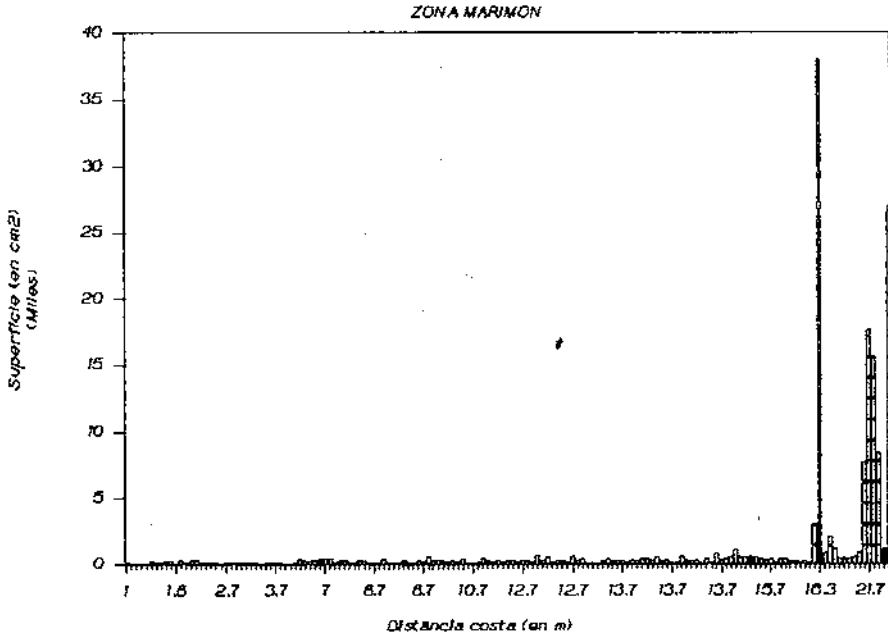


Figura 2. Diagrama de barres del transecte dels valors de les superfícies (cm^2) dels blocs travertínics situats a la distància indicada de l'àrea I (Marimon).

Taula 2. Valors paramètrics mitjans i desviació típica (σ) dels travertins en formació de l'estany de Banyoies distribuïts en les diferents àrees de la figura 1.

Àrea	Fondària*	σ	Superfície**	σ	Dist. Costa*	σ
I	1,014	0,6432	3,2063	6,2233	24,63	6,82
II	1,219	0,1685	0,1622	0,1532	11,01	3,39
III	1,008	0,1228	0,6836	1,0074	31,80	4,32
IV	1,299	0,1352	0,7975	1,3675	7,52	3,89
V	1,048	0,3796	0,4468	0,7123	4,87	2,72
VI	1,087	0,5755	0,6767	0,3855	25,08	1,75
VII	0,753	0,2177	0,4274	0,4004	10,91	5,76

* en m.

** en m^2 .

l'àrea I (pesquera Marimon), situada a l'extrem sud de l'estany. Es pot observar que els travertins més desenvolupats es troben entre els 16 i 28 m de distància a la línia de costa. La relació entre la superfície i l'orientació es mostra en la figura 3 i correspon a la mateixa àrea I. L'orientació més freqüent oscil·la a l'entorn 20 graus (vegeu taula 2).

Les figures 4 i 5 corresponen a la relació entre superfície i orientació de les subàrees 15 i 17-18 respectivament, a la zona de Cap de Bou (Àrea VII). En la primera, l'orientació més freqüent està poc definida, encara que la moda oscil·la entre els 70-100 graus. En les subàrees 17-18 de la figura 5 l'orientació més freqüent es troba als voltants dels 140 graus.

A la figura 6 s'observa la relació entre la distància a la costa i l'orientació en les zones 1 a 9 (Àrea IV). L'orientació preferent es situa entre els 50-60 graus, a més de les formes arrodonides sense direcció preferent de creixement.

La figura 7 correspon al perfil de temperatures d'un transecte realitzat en l'àrea I, en condicions de calma estival (juliol 1987) en el moment de màxim escalfament de l'aigua. Es pot observar un lleuger augment de la temperatura (1-2 dècimes de grau) prop de la zona de travertins en formació.

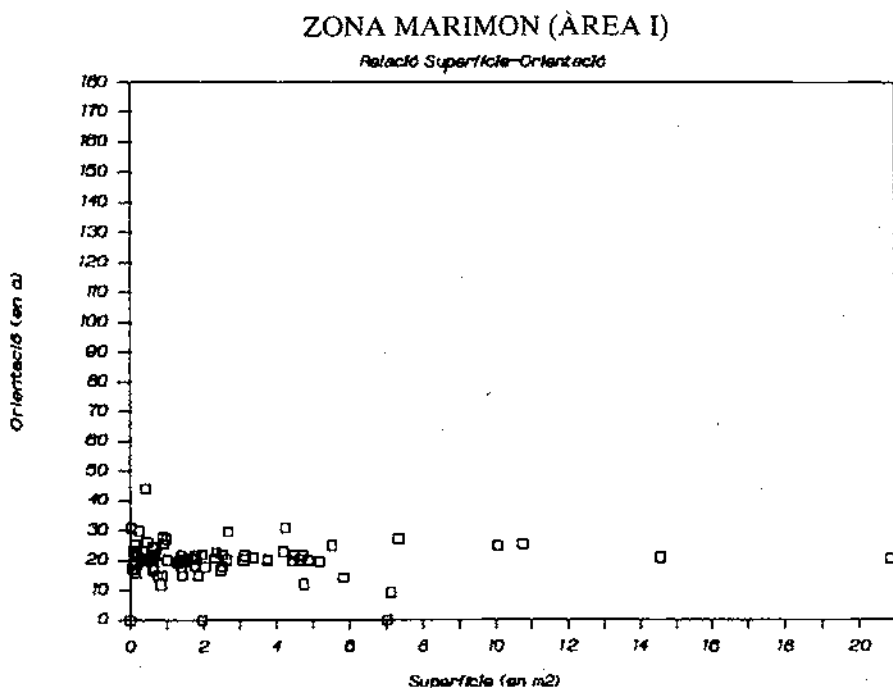
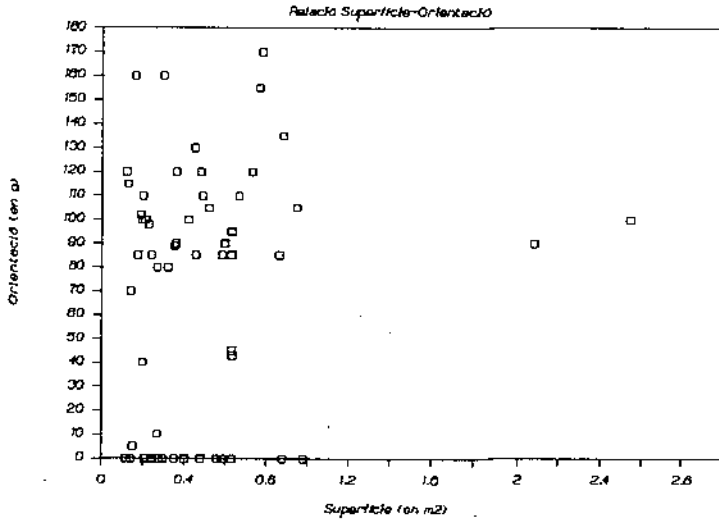


Figura 3. Orientació dels blocs travertínics en graus respecte al nord en funció de la superfície en m². L'orientació és constant al voltant dels 20° N per a tots els blocs de l'àrea I.

ZONA CAP DE BOU (SUBÀREA 15)



ZONA CAP DE BOU (SUBÀREES 1-9)

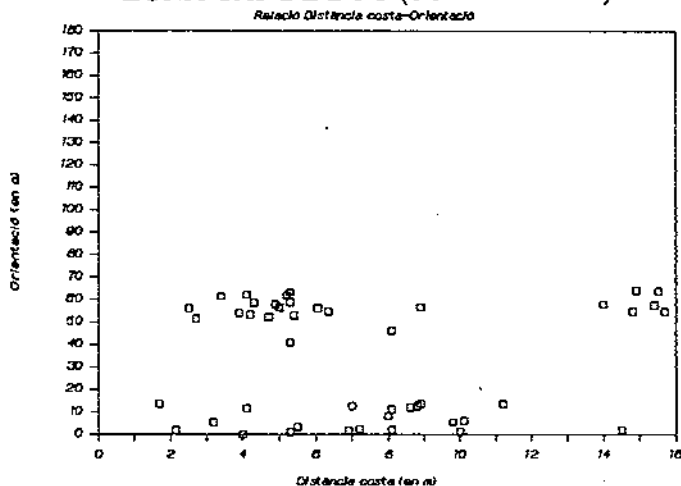


Figura 6. Relació entre l'orientació i la distància a la línia de costa dels blocs travertínics de les subàrees 1-9 que corresponen a la totalitat de l'àrea IV. S'observa una clara tendència a la disposició paral·lela a la línia de costa dels blocs travertínics en zones arrecerades dels vents del nord. A la taula 1 es presenten els valors numèrics de les orientacions.

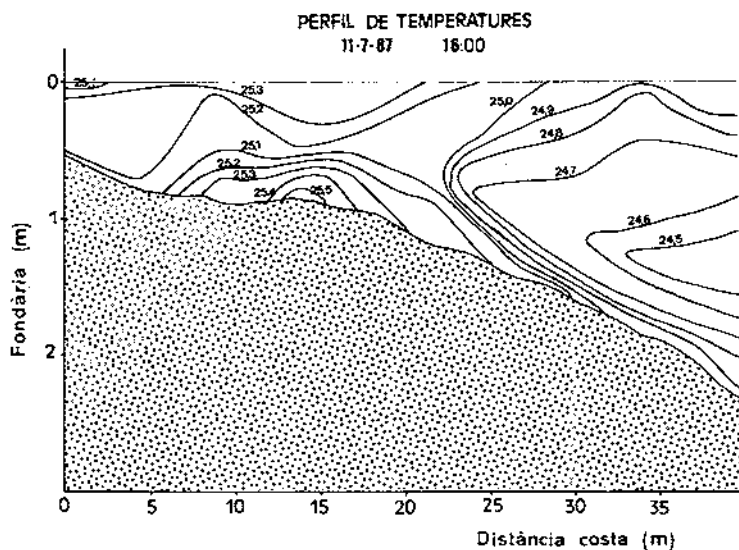


Figura 7. Perfil de les temperatures observades en el transecte perpendicular a la línia de costa a la zona Marimón (àrea I). S'observa l'escalfament diferencial en la superfície del travertí i que afecta els volums d'aigua immediatament sobrejaccents. També es pot observar l'efecte d'ombregiat dels arbres de la ribera fins uns 8 m de distància de la costa.

A la figura 8 es pot observar un perfil que relaciona la concentració de clorofil·la *a* amb la gruixària d'una cata presa en un bloc de travertí en formació de l'àrea I situat a 14,8 m de distància de la costa i a 70 cm de fondària (abril 1988). La màxima concentració de clorofil·la *a* està situada als 13 mm de fondària a l'interior del travertí.

DISCUSSIÓ

Els paràmetres de caràcter físic descriuen la distribució i, en part, determinen la morfologia general externa dels travertins en formació. Es desprèn de la taula 2 que la fondària a la qual majoritàriament s'assenten els travertins en formació es troba al voltant d'1 m. Aquesta és una constant en totes les àrees estudiades i, segons sembla és una conseqüència de la batimetria de l'estany, en relació a les condicions òptimes pel desenvolupament dels blocs travertínics.

Aquestes condicions, per tant, es poden expressar com a funció de la distància a la costa que és variable entre les diferents àrees. A les àrees I, III i VI existeix una àmplia plataforma travertínica antiga que ha estat colonitzada de nou per travertins en formació.

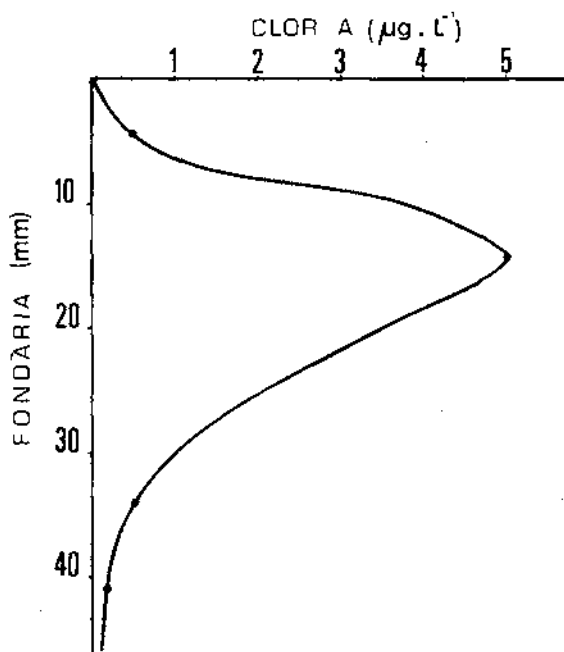


Figura 8. Distribució en profunditat de la concentració de clorofil·la *a* en un bloc de travertí a l'àrea I (pesquera Marimon, abril de 1987). Es pot apreciar que el pic màxim de concentració de clorofil·les se situa al voltant dels 13 mm de fondària del travertí.

Per tant, de la disposició dels travertins en formació es pot deduir que creixen el més allunyats possible de la costa, sense l'efecte de l'ombregat dels arbres, però a una fondària compatible amb la quantitat de llum necessària pel seu creixement.

Pel que fa a la superfície mitjana, en la mateixa taula 2, pot observar-se una considerable diferència entre l'àrea I, de blocs molt grans i la resta d'àrees que presenten una certa homogeneïtat pel que fa a aquesta mesura. Es pot considerar l'àrea I com la més madura de totes, és a dir, d'alguna manera la zona on l'activitat formadora de travertins pot ésser més activa (fig. 2).

L'aspecte que d'alguna manera defineix més la distribució dels travertins en formació i també la seva morfologia és l'orientació (taula 2), que en el conjunt de les àrees pren valors diferents tot i que aquests responen a una certa lògica. Així, en l'àrea I els valors de l'orientació dels blocs travertínics corresponen a una disposició a l'entorn de la perpendicularitat respecte a la línia de costa prop de la pesquera Marimon. En moltes altres zones ho fan paral·lelament a la costa (subàrees 1, 3, 4, 5, 6, 10 i 13 de la taula 2), d'acord amb l'orientació de la costa respecte al nord.

Ja que a la taula 1 es consideren els valors mitjans cal tenir com a referència les figures 3 a 6, perquè els valors de la taula no discriminen les orientacions 0 graus, molt freqüents, i que corresponen a blocs arrodonits.

Així, a partir de les mesures d'orientació del conjunt d'àrees es pot concloure que en l'àrea I (figura 3) els blocs travertínics prenen una orientació pràcticament perpendicular a la línia de costa, mentre que les restants subàrees (figs. 4, 5 i 6) la tenen paral·lela. Si s'observa la figura 1, es comprèn que la situació de l'àrea I correspon a la de màxim recorregut de les ones empeses pels vents del nord, que són els més forts i persistents de la zona de l'estany de Banyoles.

El fenomen eòlic, doncs, determinaria, segons la present hipòtesi, la disposició orientada cap al nord d'aquests blocs de travertí actiu de l'àrea I (Pesquera Marimón), tot seguint el model de l'efecte escullera de la quilla d'un vaixell. És en aquesta zona on també es troben, els blocs travertínics més grans (taula 2). Les condicions òptimes pel creixement del travertí en aquesta zona, com és una gran àrea plana a suficient distància de la costa (llosa travertínica antiga) per evitar l'efecte negatiu de la vegetació litoral, o l'acumulació de sediments i matèria orgànica, pot explicar que, alhora, sigui la zona amb major efecte eòlic a través de les onades i on es troben els travertins en formació més grans.

En els altres casos (zona del cap de Bou) la variabilitat ve determinada per l'antiguitat de cada bloc, essent molts d'ells de formació recent —per tant de superfície molt petita i orientació moltes vegades heterogènia— encara que amb tendència a situar-se paral·lels a la línia de costa.

En el transecte de temperatures de la figura 7 es pot observar l'efecte de l'escalfament en la zona situada entre 10 i 25 m de distància a la costa de l'àrea I (zona Marimon). És aquí on es concentren els travertins en formació.

Aquest augment de la temperatura es deu a l'absorció diferencial de la radiació lumínica a causa de la presència d'organismes fotosintètics en suficient quantitat que escalfen l'aigua en contacte amb ells. Si es té en compte que la radiació infraroja ha estat absorbida per l'aigua, aquest escalfament de l'aigua en contacte amb els blocs travertínics correspondria a l'emissió de radiació calorífica per part dels travertins en formació, després de la absorció de la radiació visible. Aquesta arriba quan part de l'energia és emesa posteriorment en forma de calor.

La distribució de la concentració de la clorofil·la *a* en profunditat dins del travertí es mostra a la figura 10. Prop dels 13 mm de fondària es presenta un pic màxim de concentració de clorofil·la ($5 \mu\text{g/L}$). Fins els 13 mm, la clorofil·la va augmentant progressivament. Aquests pigments es corresponen amb la presència d'una capa efímera activa en aquesta zona (fig. 9) que creix damunt dels travertins en formació durant la primavera (abril-maig) i comença a desaparèixer entre l'agost i el setembre. Situat a 13 mm de fondària en primavera i a 2-3 mm a l'hivern (sense la capa efímera) es troba el màxim de clorofil·la del travertí en formació que sol tenir entre 1-2 mm d'espessor.

Pel que fa a la composició biològica, la capa superior efímera és heterogènia, bàsicament formada per clorofícies, diatomees i hifes de fongs. A continuació apareix una capa de transició composta de diatomees (*Navicula* i *Chlorrella* principalment) i abundant precipitat de CaCO_3 , que li dona un color blanquinós amb, esporàdicament, cianobacteris filamentosos. Finalment s'arriba a la capa formadora de travertins de color verd-blavós, composta per dues espècies de cianobacteris filamentosos (possiblement *Lyngbia*, *Oscillatoria* o *Anabaena*) (Figs. 9 i 10). És factible que els bacteris fototròfics del sofre es puguin trobar per sota de la capa activa de formació del travertí (Stal, 1985, Jorgensen et al., 1987).

Més enllà dels aspectes físico-químics als quals fa referència el present article, les perspectives d'estudi s'encaren cap al coneixement i cultiu dels cianobacteris implicats en la formació de travertins i, per extensió, a les seves comunitats de microorganismes que es distribueixen en fondària, així com, consegüentment cap a la comprensió del seu model de creixement, per poder comparar-los amb els ja definits per diferents autors (Casanova, 1980, 1981; Jorgensen et al., 1987). Per això s'han inclòs resultats referents a concentració de clorofil·la *a*. La importància de poder conèixer el model de creixement recau en el fet que es podria compendre millor la hipòtesi de distribució, així com el canvi constant d'orientació que es produeix a mesura que creix el bloc.

A causa de l'escàs coneixement que es té d'aquest tipus de formacions travertíniques s'anirà aprofundint de manera progressiva en la investigació de la problemàtica microbiològica que planteja el seu creixement per l'activitat de cianobacteris.

Les formacions travertíniques de l'estany de Banyoles representen un fenomen singular, resultat de l'equilibri dinàmic entre la formació i la destrucció contínues i poden ser indicadors de la salut biològica del conjunt de l'estany.

TALL D'UN TRAVERTÍ ACTIU

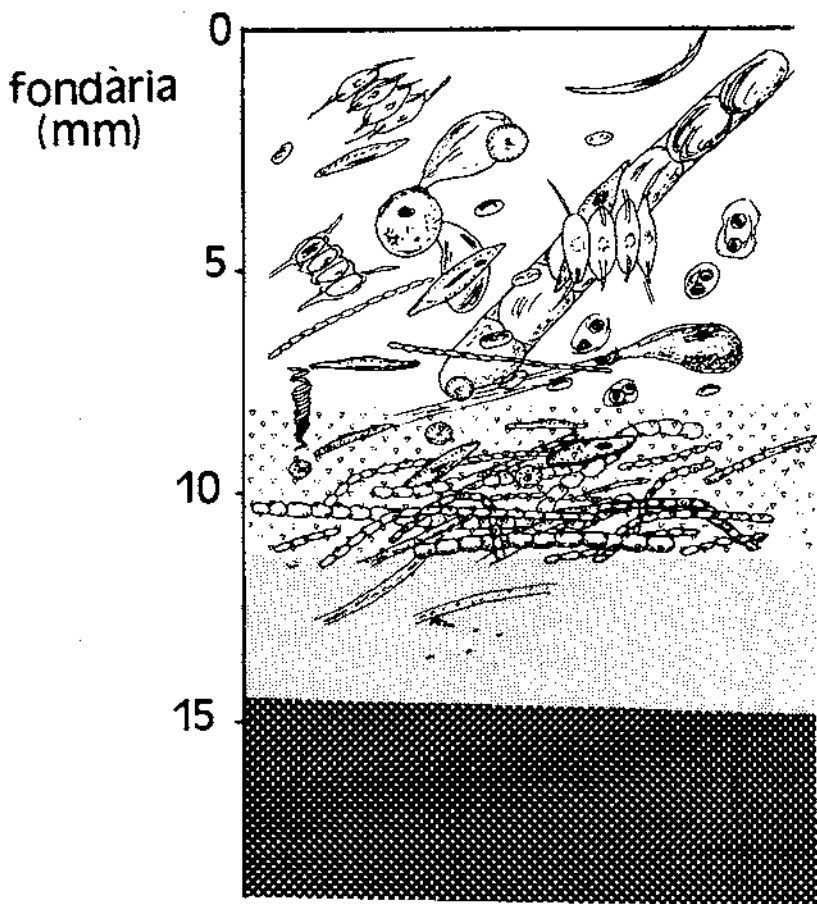


Figura 9. Model de distribució dels microorganismes actius en la formació del travertí. Fins als 8 mm la capa efímera que creix de l'abril a l'agost conté: *Scenedesmus*, *Chlorella*, *Navicula*, *Closterium*, *Aphanothece*, *Aphanocapsa*, espores i hifes de fongs, etc.). A sota hi ha la capa de transició amb un estrat blanquinós que correspon a una precipitació de CaCO_3 (amb *Navicula*, *Chlorella*, cianobacteris filamentosos i esporàdicament *Spirulina*). Més avall (13 mm) hi ha subjacent la capa activa de cianobacteris, (*Oscillatoria*, *Lyngbia* o bé *Anabaena*). Com més endins del bloc, les comunitats passen a ser sulfat reductors i potser bacteris vermells del sofre.

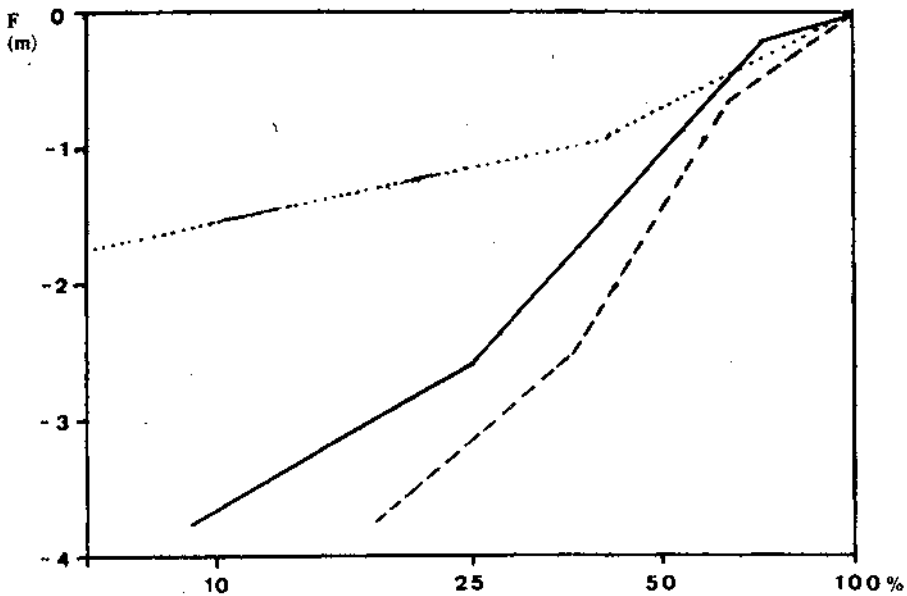


Figura 10. Aspecte del cianobacteri dominant formador de travertí. És filamentós, amb beina i poc mòbil o immòbil. (Contrast de fases 1000X).

El coneixement del procés de formació actual permetrà comprendre en el futur, els factors que han actuat durant les èpoques geològiques les quals han format la placa travertínica de la zona lacustre de Banyoles.

Bibliografia

- ABELLA, C.A. (1986). L'ecologia microbiana a l'estany de Banyoles. A: *Sortides de camp. Set itineraris per la Catalunya Central*. Ed. Eumo, Vic, pp. 137-156.
- BRUNSKILL, J., (1969). Fayetteville Green Lake, New York. II. Precipitation and Sedimentation of calcite in a meromictic lake with laminated sediments. *Limnol. Oceanogr.*, 14:830-847.
- CASANOVA, J. (1980). Observations sur la nanostructure des carbonates en milieu stromatolitique continental. Réunion sur Cristallisation, deformation et dissolution des Carbonates. Université de Bordeaux III., pp. 99-111.
- CASANOVA, J. (1982). Morphologie et biolithogenèse des barrages de travertins. A: J. Nicod (ed). *Formations carbonatées externes, tufts et travertins*, pp. 45-54. Aix-en-Provence.
- CASANOVA, J. (1984). Genèse des carbonates d'un travertin pléistocène: interprétation paléocécologique du sondage Peyre I (Combrégnac, Aveyron). *Geobios, Mém. special*, 8:219-225.

- COMA, M. V., OROMÍ, O. & ABELLA, C. A. (1987). Cartografia dels travertins en formació de l'estany de Banyoles. *Scientia Gerundensis*, 13:65-74.
- DEAN, W.M. & FOUCH, T.D. (1977). Lacustrine environments. A: A. Sholle, D.G. Bobout i C.H. Moore (eds.). *Carbonate depositional environments*: 97-130. American Association of Petrology Geologists.
- JORGENSEN, B.B., COHEN, Y., & DESMARAIS, D.J. (1987). Photosynthetic action spectra and adaptation to spectral light distribution in a benthic cyanobacterial mat. *Appl. Environmen. Microbiol*, 53:879-886.
- JULIÀ, R. (1980). *La conca lacustre de Banyoles-Besalú*. Monografies del Centre d'Estudis Comarcals. Banyoles.
- JULIÀ, R., MAROTO, J. & SOLER, N. (1987). La mandíbula de Banyoles. Antecedents i context de la seva troballa. *CYPSELA VI*: 43-52.
- STAL, L.J. (1985). *Nitrogen fixing cyanobacteria in a marine microbial mat*. Tesi Doctoral. Rijksuniversiteit Groningen.
- TAKAHACHI, M. & ICHIMURA, S. (1968). Vertical distribution and organic matter production of photosynthetic sulfur bacteria in Japanese lakes. *Limnol. Oceanogr*, 13:644-645.