

**DESENVOLUPAMENT  
D'UN SISTEMA PREDICTIU  
DE LA QUALITAT  
I LA SEGURETAT  
DE LES AIGÜES DE BANY,  
A CÀRREC DE  
FRANCISCO LUCENA,  
DE LA UNIVERSITAT  
DE BARCELONA**

## 1. ANTECEDENTS I ESTAT ACTUAL<sup>1</sup>

L'ús de platges per banyistes comporta riscos de transmissió de malalties infeccioses. Alguns d'aquests riscos sanitaris es deriven del contacte directe entre els banyistes, és a dir, pels microorganismes aportats pels mateixos banyistes i d'altres que es deriven de microorganismes d'origen fecal que arriben a les zones de bany per descàrregues d'aigües residuals i per les escorrenties de diferents orígens.

Per a portar el risc d'infecció per microorganismes d'origen fecal a la mínima expressió es va crear la normativa comunitària 76/160/EEC (vigent). Aquesta normativa ha contribuït moltíssim a millorar la qualitat de les aigües a les zones de bany, i ha influït positivament en els programes de sanejament malgrat les mancances o limitacions.

Una de les limitacions principals de la normativa comunitària 76/160/ECC són els paràmetres microbiològics especificats que cal mantenir per sota d'uns valors límits. La poca persistència al medi marí dona lloc a interpretacions errònies de la qualitat microbiològica del aigua, atès que hi ha un grup important de microorganismes patògens (virus i protozous) que segueixen persistint un cop els microorganismes indicadors especificats per la normativa s'han inactivat.

Aquest fet ha comportat que molts experts considerin que el compliment de les normatives amb els paràmetres microbiològics actuals no garanteixen la protecció del banyista, la qual cosa ha provocat que la Unió Europea retardi la implantació d'una nova normativa per a les aigües de bany.

Aquesta limitació, juntament amb el fet que la normativa es fomenta en la realització d'unes mesures que ens indiquen que l'aigua ha estat contaminada uns dies abans, ha

1. Aquest treball ha estat fet amb la col·laboració de Joan Ramon Vidal, Jordi Dellundé, Javier Méndez i Ramon Parés.

comportat que d'una manera pluridisciplinària es cregui necessari i viable la possibilitat d'implantar un sistema predictiu de la qualitat microbiològica de les aigües de bany basat en la interrelació dels models hidrodinàmics, meteorològics i de processos existents.

## 2. NECESSITAT DE DESENVOLUPAR UN SISTEMA PREDICTIU

Catalunya és un país on la disponibilitat d'un sistema d'aquest tipus sembla molt interessant. La seva geografia, climatologia i els més de 500 quilòmetres de costa ha fet que amb el temps esdevingués un important destí turístic. La qualitat reconeguda de les seves platges ha dut que una gran part d'aquest turisme triï la franja costanera com a destí final.

Aquest important augment de turisme a la franja costanera al llarg dels últims anys ha provocat un increment important de l'abocament d'aigües residuals al litoral. L'ús de les platges per part de milions de banyistes durant bona part de l'any pot provocar i de fet provoca problemes lligats a riscos sanitaris, i per tant el control d'aquests abocaments i la valoració de l'efecte dels seus efluent sobre les zones recreacionals són prioritaris.

La necessitat de desenvolupar un sistema predictiu estaria determinat principalment per tres motius principals, que serien:

1) La realitat econòmica del país: una de les principals fonts d'ingressos del nostre país és el turisme. Cada vegada més el turisme busca la qualitat del nostre medi ambient i, especialment, el bon estat de les platges.

2) La difusió de la informació: la rapidesa en la distribució de la informació de la qualitat de les aigües de bany és encara molt lluny de satisfer les necessitats reals dels usua-

ris. Sembla poc seriós notificar que les aigües de bany que va utilitzar la gent fa una setmana presentaven un risc sanitari.

3) La capacitat del medi aquàtic de canviar la qualitat tant pel que fa a punts propers dins d'una mateixa àrea (espacial) com entre dues campanyes de mostreig (temporal). Això no es resol amb l'anàlisi puntual que s'està desenvolupant actualment. En canvi, un sistema basat en un model alimentat per dades en temps real escurçaria enormement la periodicitat en la predicció de resultats.

### 3. MODELS PREDICTIUS

Avui no es coneixen pràcticament antecedents en el camp de la predicció de la qualitat microbiològica de les aigües de bany. Els sistemes tant d'anàlisi com de distribució de la informació de la qualitat de l'aigua de les platges continuen sent lents, de manera que es tracta d'una valoració *a posteriori*.

Actualment, la qualificació es fa pel grau de valoració de la platja en funció de les anàlisis obtingudes els dies anteriors, la qualificació segons els resultats de l'any anterior (ex. bandera blava) i per la informació local dels Ajuntaments dies després de les anàlisis.

Aquest fet comporta un evident risc sanitari, sobretot en l'àrea mediterrània, on s'ajunten tres factors claus:

1) L'ocupació excessiva de la franja costanera, que comporta una gran aportació d'aigües residuals al mar en àrees properes a punts de màxima utilització de les platges.

2) La particularitat de la climatologia mediterrània, caracteritzada per les grans taborinades al final de l'estiu, que apareixen de forma sobtada i desapareixen ràpidament. Això comporta una gran aportació d'aigües contaminades a la franja costanera en èpoques de màxima ocupació de les platges.

3) La hidrodinàmica marina, que provoca que els abocaments produïts a la línia de costa no es dispersin de forma ràpida a causa, entre d'altres factors, de l'absència de mareas.

#### 4. ANTECEDENTS DE MODELS PREDICTIUS DE LA QUALITAT DE LES AIGÜES DE BANY

L'únic antecedent conegut és el desenvolupament d'un sistema predictiu a una zona pilot de Nova Jersey (EUA) a dotze platges de l'estat, *designing an interface for a coastal water quality prediction system*. En aquest cas, s'utilitza un sistema predictiu de meteorologia per a desenvolupar un model que permetrà avaluar els possibles abocaments d'aigües residuals a la línia de costa, de manera que es pugui aconsellar la no-utilització de certes platges en funció dels resultats esperats.

301

#### 5. VIABILITAT DE DESENVOLUPAR UN SISTEMA PREDICTIU

L'abril de 1997 es va reunir per primera vegada una comissió d'experts de diferents disciplines i de diversos països per a valorar la viabilitat de desenvolupar sistemes predictius sobre la qualitat microbiològica de les aigües de bany (*Workshop on the feasibility of an a priori measurement approach for managing bathing water quality*, Sitges, 1997).

Les conclusions van ser que, malgrat que la legislació vigent té un important paper en la protecció de la qualitat de les aigües de bany, les mesures *a priori* ofereixen molt bones possibilitats de millorar el sistema de treball i poden ser desenvolupades en un espai de temps relativament curt. Aquests sistemes es poden desenvolupar, i segons la complexitat i la sensibilitat de l'àrea podrien ser simples sistemes experts o podrien incloure models hidrodinàmics molt més complexos (figures 1 i 2).

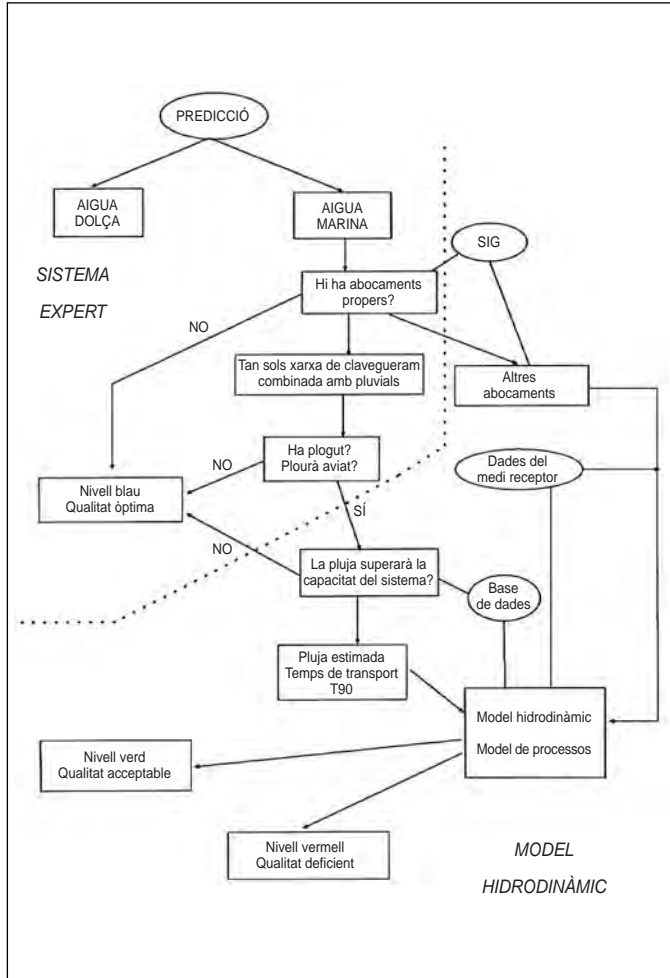


FIGURA 1. Esquema de funcionament d'un model predictiu de qualitat d'aigües de bany.

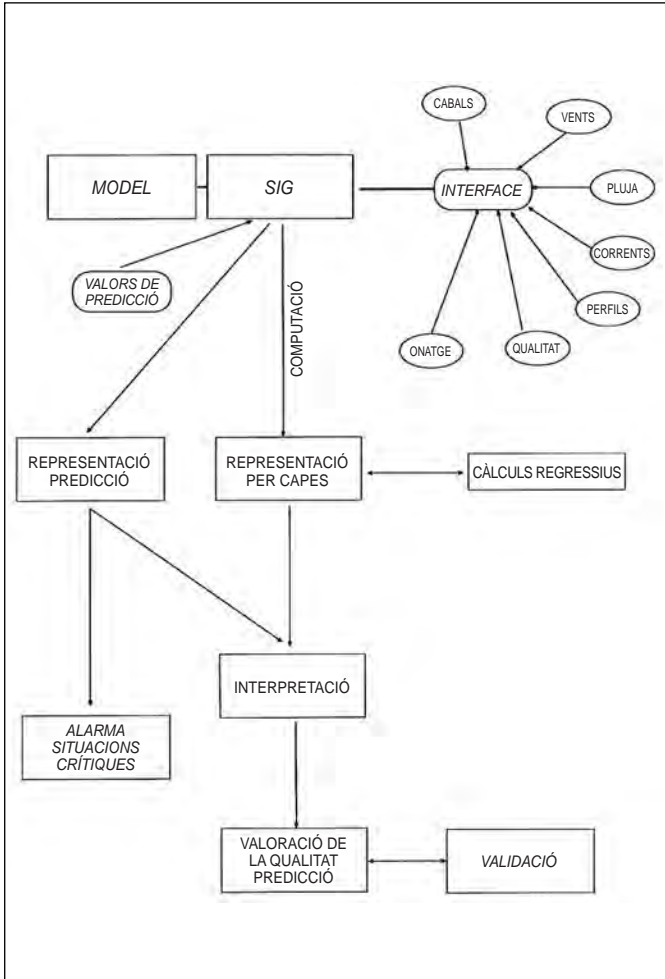


FIGURA 2. Esquema general d'un model predictiu.

### 5.1. *Eines necessàries*

El desenvolupament d'un model predictiu com el que s'ha exposat faria necessària l'actuació d'un important equip multidisciplinari. El conjunt d'aquest equip hauria de fer possible que es poguessin recollir dades de la microbiologia de l'aigua i meteorològiques, mesures a temps real, models de distribució de contaminants, i sistemes d'informació geogràfica i de teledetecció aplicats al control del medi marí.

*Microbiologia.* El paràmetre microbiològic que caldria utilitzar per al model de predicció de la qualitat de les aigües de bany haurien de ser el d'*E. coli* o enterococs fecals, ja que en principi són els que preveu la nova legislació de bany de la UE (CEE/ 94 C112/07), que serviria per a avaluar la qualitat microbiològica de l'aigua del litoral.

*Mesures a temps real.* La necessitat d'obtenir informació en temps real de certs paràmetres característics de la qualitat de l'aigua ens ha fet pensar en la possibilitat d'utilitzar radiòmetres ja contrastats que permetin fer aquestes mesures amb celeritat.

Els sòlids en suspensió són un difusor habitual de la radiació incident en l'aigua i molts autors han comprovat una correlació molt forta entre la concentració de sediments en suspensió i la radiància espectral. Aquesta relació ha estat utilitzada per la teledetecció per a estimar aquestes concentracions a les aigües com una eina per a controlar-ne la qualitat. A causa de l'estreta relació existent entre les matèries en suspensió i la càrrega fecal de les aigües abocades que són objecte d'aquest estudi, es poden extrapolar els resultats obtinguts a valors de la qualitat de les aigües.

Una darrera tècnica per a optimitzar els resultats de l'anàlisi espectral ha estat l'ús de l'espectroscòpia diferencial. Aquesta tècnica utilitza el canvi de la radiància espectral respecte a la longitud d'ona en un primer ordre o en un ordre



més alt. Se suposa que els components de la variació són constants additives, que actuen de manera espectralment independent sobre un rang espectral d'alguns nanòmetres.

*Meteorologia.* Al llarg d'aquests últims anys, els potents sistemes d'observació i la millora del coneixement científic sobre els fenòmens atmosfèrics que ens afecten han permès crear uns sistemes predictius molt avançats.

El nou model numèric de predicció HIRLAM 2 (*High Resolution Limited Area Model*) amb un nivell de reixeta de 17 quilòmetres de resolució espacial horitzontal i amb 31 nivells de resolució vertical, permet simular estructures atmosfèriques de dimensions molt petites juntament amb la possibilitat de descriure fenòmens atmosfèrics amb una antelació entre 12 i 48 hores.

Aquesta alta resolució permet establir una correlació entre la predicció de fenòmens atmosfèrics i la qualitat de l'aigua litoral, ja que estan estretament relacionats.

*Modelització dels efluents abocats al mar.* Avui es disposa de models numèrics hidrodinàmics suficientment contrastats amb els quals pot calcular-se, a partir de les previsions meteorològiques i de la distribució estacional de densitats en la columna d'aigua, els esquemes de circulació en zones costaneres, amb un cost computacional relativament petit.

Aquests tipus de models, correctament alimentats amb dades dels cabals dels efluents i de la seva qualitat microbiològica, cobertura de núvols, camp de densitats i de corrents ambientals, validats convenientment amb mesures radiomètriques i de teledetecció, poden formar part d'una eina útil de predicció de la qualitat microbiològica de les aigües de bany, atesa la capacitat actual dels ordinadors, que permeten obtenir respostes en temps real.

*Sistemes d'informació geogràfica.* Els sistemes d'informació geogràfica (SIG) representen una eina indispensable per a acumular i representar les variables estudiades. En el

cas que ens ocupa, el resultats esperats de la qualitat de l'aigua de les platges poden ser representats amb aquest sistema, de manera que l'usuari final gaudirà simultàniament dels resultats obtinguts en tota l'àrea d'estudi. Igualment, la capacitat de representar un gran nombre de variables permetrà establir models bàsics de comportament així com correlacionar totes les variables entre si.

Atès que un SIG està basat en tècniques informàtiques, molts dels aspectes de *state of the art* en aquest camp es poden aplicar als SIG. Alguns dels punts que es poden assenyalar són:

- representació gràfica de la informació geogràfica en 3D
- SIG orientats a objectes
- SIG de temps real
- SIG distribuïts.

*Teledetecció aerotransportada aplicada al control del medi marí.* Els darrers anys s'han anat desenvolupant sensors aerotransportats amb aplicacions importants en el camp mediambiental. Un d'aquests sensors és el CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*). El CASI és un sensor òptic d'escombratge multiespectral basat en una barreta CCD, que pot captar dades en les longituds d'ona que van des de 430 fins a 950 nm, i que permet programar la configuració de les bandes. La resolució espacial (*ground pixel resolution*) és de 3 m.

Els objectius de l'aplicació dels sistemes de teledetecció a la qualitat de l'aigua litoral són:

- 1) Avaluar i quantificar la correlació entre les dades aportades pels models predictius, les obtingudes a les campanyes marines i les obtingudes pel sensor CASI.

2) En el cas d'obtenir resultats positius, veure els avantatges i els inconvenients de l'ús d'aquestes dades en el projecte de seguiment i de modelització de l'aigua litoral.

3) Posar a punt un model de tractament de variables de tipus continu, com són les variables microbiològiques i fisicoquímiques de l'aigua, en estudis de teledetecció.

4) Optimitzar la presa de dades (mínim de punts de mostra) a partir de la correlació amb les dades del sensor i de la predicció dels models hidrodinàmics.

5) Adquirir experiència sobre les regions espectrals que resulten més adients per a cada variable, amb vista a futures campanyes amb aquest sensor o amb d'altres.

6) Aplicar aquesta metodologia sistemàticament de manera que funcioni com a servei ràpid permanent per a validar el model predictiu de la qualitat sanitària de l'aigua litoral.

## 5.2. *Desenvolupament del model predictiu des del punt de vista microbiològic*

La proposta realitzada pretenia afrontar des d'una perspectiva multidisciplinària l'elaboració d'un model complex, que mitjançant unes poques mesures fetes *in situ* a temps real, de variables microbiològiques i no microbiològiques, permetés fer la predicció de la qualitat microbiològica de les aigües de bany.

L'elaboració d'un sistema predictiu com el proposat requereix, en primer lloc, una àrea pilot sobre la qual es tingui un nivell de coneixement determinat, tan pel que fa a dades disponibles com pel que fa a l'equip de treball. Considerant les dues coses i la facilitat que representa la proximitat geogràfica, es va escollir la zona nord de l'àrea metropolitana de Barcelona, el seguiment de la qual es va dur a terme des de 1980 fins ara.

El coneixement del medi receptor, és a dir, la zona costanera pilot, és primordial. La identificació i l'avaluació de les aportacions ordinàries i extraordinàries, juntament amb la caracterització fisicoquímica i microbiològica, s'ha de fer amb molta precisió, tenint en compte que en determinades ocasions poden tenir lloc aportacions degudes a episodis de fortes pluges o temporals.

Els treballs elaborats al llarg dels darrers anys han permès establir els nivells basal de contaminació microbiològica de l'àrea d'estudi, la pèrdua i la recuperació de la qualitat microbiològica de l'aigua després d'episodis de fortes pluges o temporal, juntament amb la possibilitat d'aplicació de la teledetecció com eina de validació dels punts crítics del sistema predictiu, i la incorporació de nous paràmetres microbiològics d'interès per a fer mesures a temps real.

#### 6. RECUPERACIÓ DE LA QUALITAT DE LES AIGÜES DE BANY DESPRÉS D'EPISODIS EXTRAORDINARIS

Al llarg de les campanyes d'anàlisi de la costa nord de l'àrea metropolitana de Barcelona, s'han produït episodis extraordinaris de pluges torrencials i temporals que han permès fer els estudis necessaris per a arribar a un model molt senzill (cinètica de primer ordre,  $y = ax + b$ ) de recuperació de la qualitat microbiològica de l'aigua de bany (figura 3).

Mentre que els nivells de contaminació microbiològica basal o considerats normals se situaven entre el  $10^0$  i  $10^1$  coliformes o enterococs fecals, després d'un episodi extraordinari de pluges intenses o de mar de fons (temporal), augmentaven fins a 3 logaritmes, i es trobaven entre  $10^3$  i  $10^4$  coliformes o enterococs fecals. Les anàlisis dels dies posteriors van permetre establir un temps mínim de recuperació de la qualitat microbiològica de l'aigua litoral entre 48 i 96 hores.

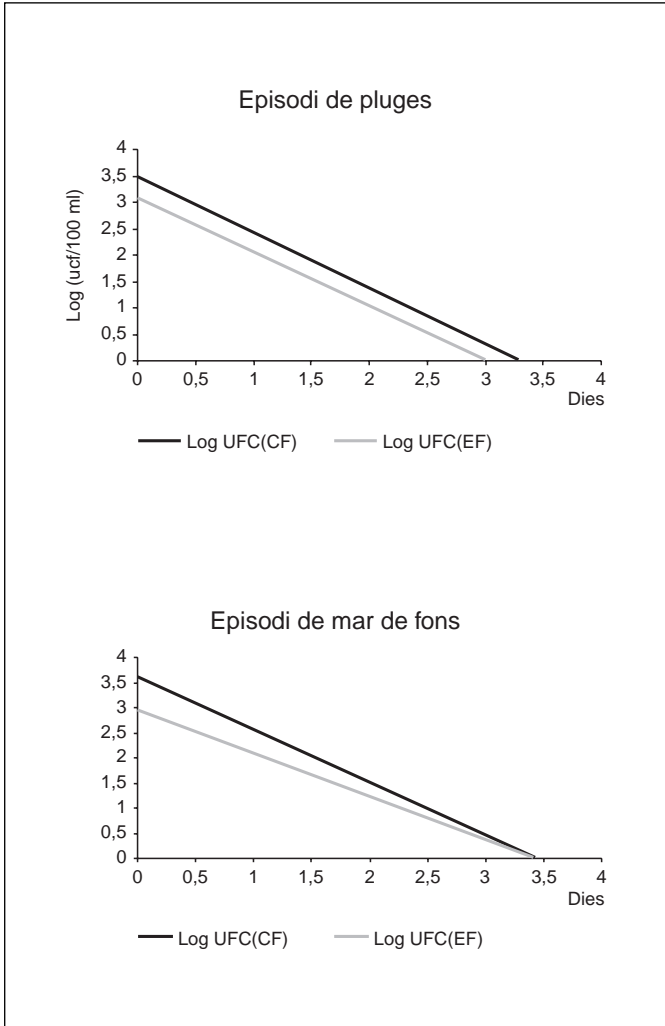


FIGURA 3. Recuperació de la qualitat microbiològica de l'aigua després d'episodis extraordinaris segons un model matemàtic de primer ordre. La regió semitransparent de les rectes correspon als valors logarítmics considerats normals.

*Validació dels punts crítics del sistema de predicció.*

Juntament amb el sistema predictiu es preveu l'ús d'un model hidrodinàmic acoblat a un model de decaïment dels contaminants microbiològics amb la finalitat que aquest model ens doni a cada moment un mapa de la distribució dels contaminants microbiològics i que ens defineixi uns punts crítics de control, que han de servir per a fer la validació del sistema de predicció.

La credibilitat d'aquest sistema de predicció depèn del fet que es pugui validar el model. Aquesta validació es fonamenta en la realització de mesures de paràmetres microbiològics en els punts crítics de control que haurà donat el model, per a comprovar si les diferents variables s'ajusten a les prediccions del model, i en la teledetecció.

La teledetecció en els estudis ambientals es basa en el concepte que cada tipus d'objecte (arbre, cultiu, carretera, aigua...) emet o reflecteix una radiació de forma característica, fet que permet que es diferenciï de la resta d'objectes.

L'aplicació d'aquesta tècnica en diferents campanyes marines ha permès descriure un factor 1 o de contaminació a través dels paràmetres pH, salinitat, coliformes fecals, enterococs fecals, *Aeromonas* i terbolesa, i s'han trobat uns alts nivells de correlació en la regressió multivariant entre el factor 1 de l'anàlisi de components principals i els diferents canals del sensor (0,968). De la mateixa manera, i paral·lelament, s'ha pogut arribar a establir un coeficient de correlació de 0,798 entre la variable *Aeromonas* i els diferents canals del sensor (figura 4).

Un cop coneguts tots els *inputs* contaminants, i definides les condicions hidrodinàmiques de la zona de treball, així com de l'estat que caracteritza la situació, és possible construir un model d'evolució en funció del temps a partir d'una situació tipus.

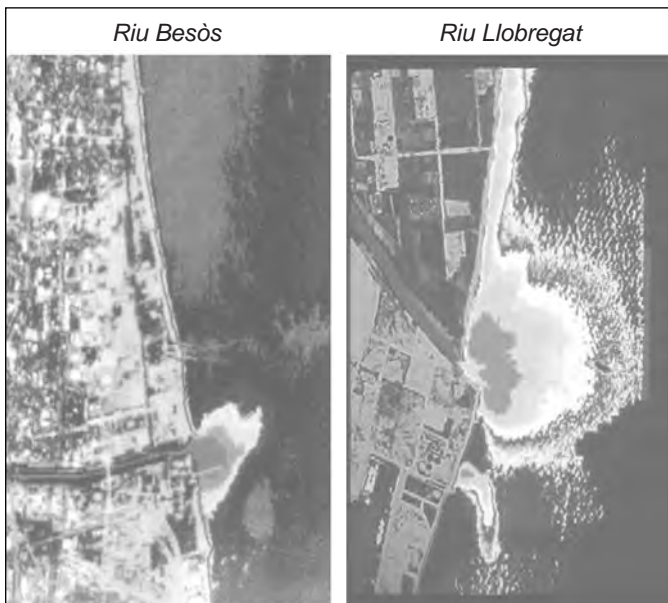


FIGURA 4. Els mapes corresponen a la distribució de les diferents variables de qualitat del medi marí al llarg d'una part del litoral. Es pot observar el grau d'afectació de cada abocament, així com el decaïment diferencial segons el paràmetre estudiat.

#### 7. NOUS PARÀMETRES MICROBIOLÒGICS INTERESSANTS: ELS BACTERIÒFAGS

Treballs publicats recentment demostren el potencial dels bacteriòfags com a indicadors de la qualitat microbiològica de les aigües de bany. El fet que el seu comportament en les aigües naturals difereixi dels indicadors bacterians, així com l'existència de relacions estadístiques entre aquests i els clàssics paràmetres de contaminació fecal (coliformes i enterococs fecals) i la senzilla metodologia per a detectar-los, fa que hagin de ser considerats indicadors potencials.

La determinació dels bacteriòfags podria representar una mesura a temps real. Les anàlisis realitzades els darrers anys ( $n > 100$ ) ens han permès demostrar que entre les 4 i 6 hores posteriors a l'anàlisi estariem quantificant entre el 50 % i el 90 % dels totals. Aquests percentatges avalarien la utilització d'aquesta metodologia, ja que ens permetria tenir una mesura a temps real, segons els criteris de la USEPA, que alimentaria el sistema predictiu.

Un cop arribats en aquest punt, seríem capaços, mitjançant mesures ràpides de paràmetres microbiològics als *inputs* del coneixement del medi físic (corrents, perfils de salinitat i temperatura), de poder establir models predictius de diferents contaminants (semiconservatius, no conservatius, etc.) a la línia costanera amb sistemes correctius, de forma global amb sensors remots, així com el desenvolupament de mesures en punts crítics del model utilitzat.

El conjunt de dades obtingudes s'integrarien en un sistema d'informació geogràfica (SIG) que permetria fer representacions gràfiques. El SIG incorporaria les dades del model hidrodinàmic i les del model predictiu de climatologia, i ens permetria fer prediccions de la contaminació de la línia costanera a temps real.

#### AGRAÏMENTS

Aquest treball ha estat fet amb la col·laboració de Joan Ramon Vida, Jordi Dellundé, Javier Méndez i Ramón Parés.