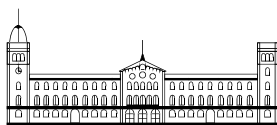




2007

***"SITUACIONS D'ANÒXIA EN ZONES ESTUÀRIQUES
SENSE FORÇAMENT MAREAL:
una aproximació als balanços producció/consum d'oxigen"***

Tesi doctoral
Xavier de Pedro Puente



TESI DOCTORAL

DEPARTAMENT D'ECOLOGIA –FACULTAT DE BIOLOGIA
UNIVERSITAT DE BARCELONA

Programa de Doctorat: Ecologia. Bienni: 1996-1998.

"SITUACIONS D'ANÒXIA EN ZONES ESTUÀRIQUES SENSE
FORÇAMENT MAREAL: una aproximació als balanços
producció/consum d'oxigen"

Memòria presentada per Xavier de Pedro Puente per optar al títol de doctor per la Universitat de Barcelona, sota la direcció del Dr. Javier Romero Martinengo i del Dr. Jordi Camp Sancho.

Dr. Javier Romero Martinengo
Departament d'Ecologia
Facultat de Biologia
Universitat de Barcelona

Dr. Jordi Camp Sancho
Institut de Ciències del Mar.
Centre Mediterrani d'Investigacions Marines i
Ambientals, CMIMA-CSIC.
Barcelona

Xavier de Pedro Puente
Barcelona, 25 de setembre de 2007



Copyright 2007 Xavier de Pedro Puente



Alguns drets reservats.

Aquest document es troba subjecte als termes de la llicència de Creative Commons:

“Reconeixement-CompartirIgual 2.5 Espanya” - <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/es/>

Índex

ÍNDEX

ÍNDEX	vii
Agraïments	xiii
Introducció	3
Antecedents	3
Dèficits d'oxigen dissolt	4
Terminologia.....	4
Conseqüències.....	5
Objectius de la tesi	6
Estructura de la tesi	6
Bibliografia	8
Capítol 1 Hidrodinàmica de la badia dels Alfacs	15
Introducció als moviments d'aigua en estuaris	15
Processos que condicionen la hidrodinàmica.....	15
La importància de l'oscil·lació mareal.....	18
L'efecte del vent.....	18
Els aportats d'aigua dolça.....	19
Objectius del capítol	20
Descripció de l'àrea d'estudi	20
Característiques generals.....	20
Oscil·lació mareal.....	22
L'aigua dels canals.....	23
Metodologia	25
Model de caixes.....	25
Entrades d'aigua dolça.....	29
Mesures directes de fluxos i altres registres.....	29
Origen de les dades meteorològiques.....	30
Evaporació, evapotranspiració i precipitació neta.....	30
Tractament de les dades.....	31
Resultats	34
Fluxos d'aigua entre compartiments.....	34
Oscil·lació mareal.....	34
Corrents d'aigua.....	36
Vent, pluja i pressió atmosfèrica.....	42
Relacions entre variables.....	45
Correlacions dependents d'escala (SDC).....	47
Discussió	52
Components del corrent observat.....	52
Marea astronòmica.....	52
Diferències de densitat.....	53
Influència del vent.....	53
Episodis puntuals d'acoblament entre vent i corrent.....	55
Diferències de pressió atmosfèrica.....	55
A mode de resum.....	56
Apunt final: singularitat hídrica de la Badia dels Alfacs.....	56
Bibliografia	58

Capítol 2	<i>Meteorologia de la badia dels Alfacs i característiques fisico-químiques de la seva</i>	67
	<i>aigua durant la dècada dels anys 90</i>	67
	Introducció	67
	Metodologia	69
	Origen de les dades	69
	Dades meteorològiques	70
	Variables de la columna d'aigua	70
	Tractament de les dades	72
	Resultats	76
	El clima atmosfèric	76
	Irradiància subaquàtica	78
	Salinitat, temperatura, oxigen i relacions amb altres variables	80
	Concentracions de nutrients i clorofil·la a	90
	Canals d'entrada	102
	Discussió	106
	Evolució de la salinitat	106
	Comparació amb altres estuaris:	108
	Els aportats d'aigua dolça	108
	Clorofil·la a i nutrients	109
	Canvis físico-químics en la dècada dels 90	111
	Bibliografia	115
Capítol 3	<i>Descripció d'un període d'hipòxia</i>	123
	Introducció	123
	Metodologia	126
	Mostreig discret en l'espai i el temps	126
	Mostreig continu en el temps	126
	Mostreig puntual en el temps i extensiu en l'espai	127
	Altres dades	128
	Resultats	129
	Evolució temporal de l'oxigen dissolt i de l'estructura hidrogràfica	129
	Registres en continu	129
	Extensió espacial de la hipòxia	136
	Diferències entre anys	138
	Discussió	142
	Possible causa de l'origen de les hipòxies	142
	Intercanvi vertical i horitzontal durant la hipòxia	142
	Flux no advectioniu i disminució o acabament del procés hipòxic	143
	Diferències respecte a altres episodis d'hipòxia coneguts	146
	A mode de síntesi	150
	Bibliografia	151
Capítol 4	<i>Processos a la columna d'aigua que es relacionen amb la dinàmica de l'oxigen</i>	157
	<i>dissolt</i>	157
	Introducció general	157
	4.1. El plàncton	159
	4.1.1. Introducció	159
	4.1.2. Metodologia	160
	Treball de camp i de laboratori	160
	Tractament de les dades	161
	4.1.3. Resultats	161
	Canvis nets observats	161

Consum d'oxigen.....	162
4.2. Processos físics.....	164
4.2.1. Introducció	164
4.2.2. Metodologia	164
4.2.3. Resultats	166
4.3. La degradació de la matèria orgànica.....	168
4.3.1. Introducció	168
4.3.2. Metodologia	168
4.3.3. Resultats	170
Fraccions de carboni i relació amb la DBO.....	170
Clorofil·la a vs. carboni orgànic particulat i oxigen dissolt.....	173
Resultats generals	175
Producció Bruta del Plàncton.....	175
Discussió general	177
Estimes de producció i productivitat del fitoplàncton	177
Estimes de la respiració del plàncton.....	183
Flux d'oxigen a causa del vent.....	183
Consum d'oxigen i canvis en les concentracions de carboni.....	184
Fitoplàncton detrític.....	186
Bibliografia	187
Capítol 5 El paper del bentos i dels seus macròfits.....	195
Introducció general.....	195
Subcapítol 5.A. Canvis en la vegetació submergida de la badia dels Alfacs en la dècada dels 90	189
5.1. Introducció	190
5.1. Metodologia	192
Presa i processament de mostres.....	192
Tractament de les dades.....	193
5.1. Resultats	194
Distribució.....	194
Evolució temporal de Biomassa.....	197
5.1. Discussió	198
Biomasses.....	198
Estratègies ecològiques i associacions d'espècies.....	198
Anàlisi de causes possibles	199
Les toxines de les macroalgues.....	201
Importància de la colonització.....	203
Subcapítol 5.B. Metabolisme d'oxigen del Bentos	205
5.2. Introducció	206
5.2. Metodologia	208
Corbes Fotosíntesi-Irradiància (F-I) al laboratori.	208
Càlcul de la irradiància al camp	208
Autoombra de les macroalgues	210
Producció primària de les macroalgues.....	211
Incubacions in situ.....	212
Simulació dels balanços bentònics a finals d'estiu	213
5.2. Resultats	215

Corbes F-I: paràmetres fotosintètics	215
Extinció de la llum amb la fondària i la biomassa	215
Balanç fotosintètic de les macroalgues	219
Respiració del sediment	220
Balanços del bentos	222
5.2. Discussió	225
Paràmetres fotosintètics	225
Balanços globals de les algues	226
Respiració del sediment	227
Balanços globals del sistema i el paper de les algues	227
Bibliografia	230
Capítol 6 Balanços d'oxigen	241
Introducció	241
Metodologia	244
Origen i tractament de les dades	244
Anàlisi de sensibilitat i discrepància	248
Calibració de paràmetres	252
Resultats	253
Variació estacional del balanç i Balanç Net de l'Ecosistema	253
Variació espacial	254
Variacions globals	254
La situació de pas de l'estiu a la tardor	258
Índex PB:R	258
Sensibilitat i discrepància	258
Discussió	265
Ajust de les estimes d'OD als valors observats: capa del fons	265
Ajust en la capa superficial	266
El cas específic de finals de setembre	266
Contribució relativa dels diferents elements de l'ecosistema en considerar tota la badia en conjunt	270
Comparació dels balanços d'oxigen amb estudis previs	270
Comparació de les contribucions d'oxigen amb les d'altres badies	272
Síntesi de la dinàmica anual de l'oxigen dissolt	274
Estat tròfic	277
Importància de la covariància de factors ecològics per l'aparició d'hipòxies	280
Possibles mesures de prevenció de les anòxies	281
Bibliografia	282
Capítol 7 Conclusions	295
Conclusions (English version)	301
Annex A. Conseqüències de les davallades d'oxigen	311
Conseqüències sobre les característiques físico-químiques de l'aigua	311
Conseqüències sobre la biogeoquímica del sediment	311
Conseqüències sobre els organismes i l'estructura de la comunitat	312
Conseqüències sobre els fluxos d'energia	312
Conseqüències sobre la successió ecològica	312
Conseqüències econòmiques	313
Bibliografia	314
Annex B. Badies i estuaris d'arreu del Món, comentats al llarg de la tesi doctoral	319
Skagerrak, Kattegat, Mar de Belt i Mar Bàltic (Nord d'Europa)	319

Badia d'Àrhus	319
Fiords.....	320
Badia de Chesapeake i els seus subestuaris	322
Estuari del Riu James (Virginia, EUA).....	323
Badia de Tomales (Califòrnia, EUA)	324
Badia de San Francisco	325
Badia de Tampa (Florida, EUA).....	325
Estuaris a Austràlia Occidental (Austràlia).....	326
La badia-estuari Peel-Harvey	326
La badia "Wilson Inlet"	327
L'estuari de Palmiet, (Província del Cap, Sud-àfrica)	328
Badia portuària de Tolo (Hong Kong, Xina)	329
Badia d'Uranouchi (Japó).....	330
Bibliografia	332
Annex C. Augmenten les hipòxies?	337
Bibliografia	343
Annex D. "OMMEL: Oxygen Model for Microtidal Estuaries and Lagoons"	349
D.1. Introduction.....	349
D.1.1. Overview	350
D.1.2. Description of Input and Output files	354
D.1.3. Basic description of the main program (for newbies)	359
Prog. main	359
End of program main	360
D.1.4. Editing the source code using free software	360
D.1.5. Compiling the source code using free software	364
D.1.6. Showing the code as html with "Fortran" or "R" mark up.....	366
D.2. Source code	367
D.3. Sample input files.....	368
D.3.1. light.in	368
D.3.2. k.in	369
D.3.3. param.in.....	370
D.3.4. biom.in	371
D.3.5. ts.in	371
D.3.6. dboh.in	373
D.3.7. ws97h.in.....	373
D.3.8. inflows.in	373
D.4. Sample output files	375
D.4.1. o2masbal.out	375
D.5. "R-project" scripts (*.r) to plot some OMMEL results (*.out)	377
D.6. Bibliography.....	381
D.7. OMMEL Legal Notice.....	382
Annex E. Llistat de Figures	387
Annex F. Llistat de Taules.....	403
Annex G. Nota legal de la tesi doctoral.....	409
G.1. Llicència de Copyright.....	409
G.2. Clàusula d'ús no militar.....	411

Agraïments

Agraïments

Ja ha arribat el moment tan esperat d'estar en situació de poder escriure aquestes línies (el que vol dir que la resta de la tesi ja està llesta). El camí ha estat més llarg del que sembla que ningú no desitjava. Pel camí hem rigut, hem plorat, ens hem mullat (per dalt i per baix), hem viatjat, hem estimat, hem odiat, hem agraït... Hem après. I per descomptat que queden moltes coses per aprendre, tant a nivell científic, com a nivell humà.

Han estat moltes les persones, projectes i institucions per les que em sento agraït, per diferents motius en cada cas.

Les primeres persones per les qui em sento agraït són la Marta (Manzanera), Olga, Pere, Fiona, i Marta Pérez, per l'ajuda amb les campanyes i les hores i hores que hem compartit amb l'excusa de la feina relacionada amb aquesta tesi doctoral. Llàstima que els nostres camins hagin divergit i ara ens sigui més difícil trobar-nos. Quan vaig començar a col·laborar en el departament en el grup de "fanerògams" o "pusidonijs", com deïeu, ho vaig fer ajudant a la Marta M. en les seves tasques de recerca. I les estones dels primers mesos amb vosaltres Marta M. i Olga (i amb la Nuri Méndez, poques, per que ja se'n tornava cap a Mèxic als pocs mesos, pero intenses :-)) em van donar l'empenta i el bon rotllo per preparar-me per demanar la beca de tesi en el si del grup de les posidònies, aprofitant el projecte de les anòxies al Delta de l'Ebre. Moments inicials dels quals tinc molt bon record (l'epoca daurada del GEMM: "Grup d'Ecologia de Macròfits Marins", que encara duraria, al meu entendre, uns quants anys més). Un cop la Marta M. va marxar, i després (crec) també la Olga, ja no va ser el mateix. També en formava part del GEMM en Miguel Angel (Mateo), tot i que quan jo vaig començar la tesi ell ja devia estar fent l'estada postdoctoral als Països Baixos. Gràcies Miguel Angel pels intents i la disposició sincera de fer-me un cop de mà amb alguns articles i capítols de la tesi.

També tinc molt bon record d'en Miquel Àngel (Rodríguez) en aquesta etapa inicial, en que també compartíem campanyes a les Medes (per la feina de la tesi de la Marta), i fins i tot potser per alguna campanya en que vas venir al Delta per tasques de la meva tesi? (em dec fer gran, per que ja no ho recordo bé). Posteriorment vaig tornar a conèixer amb ell, i de ben aprop, a Noruega. Li estic agraït per les llargues estones compartides allà, tant per l'ajuda i "feed-back" específic amb els temes de sèries temporals, entre altres, a més de per conèixer algunes estones entranyables amb ell, i en especial durant la visita del meu pare per aquelles terres. Dies gravats a la meva memòria, on sento la teva veu i el teu riure amb plàcids records.

Recordo clarament que en Jordi González em va ajudar en una campanya molt important per mi. Quan el Jordi ho va deixar per anar-se a l'empresa, em va saber molt greu no veure'l més pel departament, doncs ell aconseguia, com alguns altres, que hi regnés molt bon rotllo al seu voltant. I

va ser un plaer que m'acompanyés a l'expedició exploratòria a la "cerca de l'aigua freàtica" de la vora nord de la Badia dels Alfacs.

Per cert, he de dir que de la gent del departament, la Olga se'n porta la palma de ser amb qui més estones he rigut entre "olguismes" i aventures vàries en que hi hem coincidit, juntament amb la Marta, primer, i els anys posteriors sense la Marta també. A més, em vas ajudar (sense saber-ho) a portar millor aquest llarg final de tesi meu, al llarg de les fugaces trobades ocasionals en què ens hem vist durant aquests darrers anys.

Al Javier Romero (el "Javier", a seques, en l'entorn del departament), li agraeixo tot el que he après d'ell i amb ell. Moltes coses a nivell científic i a nivell humà. Ja en conèixer-lo em vaig fixar en ell, per que, a part de la seva excel·lent oratòria i qualitats pedagògiques a l'aula, va ser el primer professor al qual vaig veure portar dolços a classe el dia següent d'un que no va poder venir: havia nascut la seva filla, la Mar, i ens ho va explicar a tota la classe (amb poques paraules però carregades de significat) com qui li explica a un amic; se'l veia tan agraït amb la Vida que feia goig haver estat alumne seu d'aquell any. Era el 1994. Ell és un virtuós de la paraula (tant oral com escrita, i bé ho sabem els que hem vist passar els nostres escrits per sota de les seves incansables traces vermelles de correccions i propostes de millora, tant de "fons" com de "forma"). I ha invertit molts esforços per ajudar a millorar la qualitat de la tesi que aquí es presenta. Malauradament tinc la sensació que no li he sabut agrair prou durant tots aquests anys... (a part de les hores de camp i laboratori aportades, que també han estat moltes). Les meves més sinceres gràcies, Javier.

L'any 1996 vaig fer una estada al Marine Biological Laboratory, amb l'Ivan Valiela. Tot un plaer haver-lo tingut de referent científic durant dos mesos i de tant a prop. Sóc conscient de que vaig ser molt afortunat. Jo encara tenia molts dubtes pel cap, i amb l'excusa del curs sobre processos en ecologia marina al que vaig poder assistir, vaig poder refrescar moltes coses per assentar millor les bases sobre les quals construir algunes de les preguntes que voldria respondre al llarg de la tesi. Ah, i gràcies al Javier i al Paco Comín per facilitar-me el contacte de l'Ivan per fer l'estada. Alhora, gràcies a la Valeria Astorga, per facilitar-me el contacte de la Susie Steinbach, de 86 anys (l'any 1996). Déu meu, com passa el temps, i com he permès que la tesi em fes oblidar el contacte amb persones que m'han marcat en moments determinats de la vida. La Susie, sense gaire vista ja a la seva edat, va ser un referent per les llargues converses sobre la vida i la política als EUA (però no la política dels polítics de la tele, sinó la política del carrer, de les famílies, els diaris, la cuina, la política de la cura per les coses i les persones que t'estimes....). I sé que em va cuidar com si fos un fill seu mentre vaig estar a casa seva a Woods Hole, Massachusetts (EUA).

El 1997 vaig fer la primera de les dues estades de recerca a la Universitat d'Austràlia Occidental. Aquesta va ser al Centre for Water Research, a Perth, de la mà de David Hamilton, fonamentalment, i en concret i a nivell de programació en Fortran, de'n Michael Herzfeld. Els hi estic molt agraïts. Al David, a més, per que primer a través del correu-e, i després en persona, em va saber orientar pels

camins de la modelització numèrica de sistemes dinàmics, a cavall entre el món de l'enginyeria, de la biologia d'organismes, i de l'ecologia aquàtica.

D'aquell mateix any 1997 tinc un especial record del Pere Renom, de nou, amb qui vaig anar al congrés de Sud-àfrica, on presentàvem un poster de la meva feina inicial de tesi, en la qual ell m'havia ajudat quan començava a col·laborar en el grup del GEMM. Aventures i desventures en el congrés, i en els dies posteriors pel "Garden Route" i altres indrets on vam anar per aquelles terres, tant junts, com separats (molt estimulant a nivell paisatgístic, històric, natural i cultural compartir aquells dies amb tu, Piotr). I evidentment, per si no ha quedat prou clar abans, també en totes les nombroses campanyes i experiments de la meva tesi en que has aportat les teves energies, il·lusió i bon humor.

L'any següent, 1998, vaig tornar d'estada a Austràlia Occidental, però aquesta vegada no només a continuar aprenent sobre modelització ecològica amb la gent del Centre for Water Research, sinó a més, per fer una estada al departament de Botànica Marina, en teoria amb la Diana I. Walker, però a la pràctica amb el formidable Gary Kendrick. Gràcies Gary per l'atenció que em vas prestar sempre que et vaig demanar ajuda, tant a nivell professional com a nivell personal. Llàstima que l'experiment que havíem dissenyat de mantenir diverses espècies de macròfits en fosc no va poder incloure's a la tesi doctoral. Així com tampoc totes les dades agafades amb el "PAM Fluorometry" submergible (va ser un honor que confiessis en mi per ser el primer en provar-lo al camp i al laboratori, tot sigui dit). Més dades i resultats que queden en el tinter... A nivell social, els hi estic molt agraït pel caliu humà que vaig sentir a la Margarita Margolles i el Rod Clary, amb qui vaig convida a casa seva en les dues ocasions que vaig estar a Perth, al maquíssim barri costaner de Cottesloe. De llavors també tinc un especial record de la Isabel Ramírez, que també treballava al Centre For Water Research, i amb qui vaig convida també a la mateixa casa. I de l'Adris Zarate, un germà de la Vida descobert en les nostres peregrinacions pel món, i amb qui ens hem anat seguint la pista i veient en paisos diferents durant molts anys. I en especial també vull agrair l'amistat de la Kirsteen, la Kiera Appelhans, el Julian Armstrong, i el Roeland Roelofs. I del Bernie, i la Montse Roura, que vam coincidir també a Perth els mateixos mesos, i vam fer algunes excursions tots tres plegats. I molt agraït també estic dels dies de desconnexió de tesi que al final de l'estada de recerca vaig poder passar a Broome poble i rodalies amb tenda de campanya amb el David Dureau i la seva dona, i posteriorment a Derby, a casa del Sandy i Kevin. Tots dos llocs, a l'àrea tropical de l'Austràlia occidental.

Per últim, l'any 1999 vaig fer una estada (la darrera de la beca FPU) als Països Baixos, casualment al mateix centre que havia estat el Miguel Angel, tot i que jo vaig arribar allà per altres camins molt diferents que no tenen res en comú amb els seus ni amb les fanerògames marines sinó amb la modelització en ecologia. Li estic molt agraïda a la Karline Soetaert per totes les hores de dedicació que em va regalar (i en van ser moltes al llarg de tres mesos!), així com per la seva gran capacitat de trobar i arreglar errors de programació. I en especial vull agrair el caliu humà de'n Peter Herman. Curiosament, ell no tenia per què tutoritzar ni preocupar-se per la meva feina mentre era allà al seu

centre, però ho va fer en diverses ocasions, com qui cuida els detalls de la gent que passa part de la seva vida al centre de recerca on ell també hi treballa. I li estic molt agraït de les estones que em va dedicar. La vida va fer que 5 anys més tard ens tornéssim a trobar a un congrés a Irlanda, i com sempre, les seves paraules van ser molt càlides, i la mirada, de complicitat. De l'estada al NIOO-CEMO en tinc un especial record a nivell humà de les estones compartides amb en Jose Babarro (a més va ser un plaer estar amb ell en classes de Salsa quan va conèixer la dona de la seva vida!), el François, de Marsella, i la Ilona Strelecka.

Així, l'any 2000, un cop acabada la beca FPU, vaig continuar amb la mateixa dedicació a la tesi doctoral que anys previs. I com no veia encara la sortida d'aquest túnel, vaig aprofitar per demanar fer una estada acadèmica curta a Ensenada, Baja California Norte, Mèxic (gràcies a una beca "Intercampus" de la Agencia Espanyola de Cooperació Internacional). Ens vam tornar a trobar amb la Isabel Ramírez, a Ensenada, qui em va mostrar més coses del seu país (mi "Mexico del Norte") i de la Vida. També em vaig trobar de nou amb la Nuri Méndez, qui amablement em va oferir casa seva i el seu temps, mentre vaig visitar el seu centre de recerca a Mazatlan per fer-hi unes xerrades sobre la meva feina de tesi. I l'Héctor Bustos, qui era el tutor de la estada de recerca i docència sobre química oceanogràfica en teoria al Golf de California (i molt més que tutor, no només amb mi i sinó amb tots els altres Intercampus espanyols de l'any 2000 a Ensenada). Amb ell he mantingut relació durant els anys posteriors, i a través seu, amb la seva família, qui ens ha arribat al cor a la Gloria i a mi.

D'aquest moment de l'any 2000, he d'agrair de nou al Javier la seva confiança en les meves capacitats com a docent per facilitar-me la possibilitat de treballar de professor de Biologia a l'escola "Aula, Escuela Europea", on hi vaig estar 5 mesos substituint al Sr. Pere Cairó. Un altra etapa de "temps mort" de la tesis, que em quedà marcada, amb els noms de Sr. Pere Ribera, Sr. Joan Lloró., entre el professorat, i molts alumnes, amb alguns dels quals hem tornat a coincidir. També des de llavors (2000) he vingut donant l'assignatura de "Salut i Medi Ambient", a l'Escola Universitària d'Infermeria de Sant Joan de Déu, on he anat aprenent (a base d'assaig i error) les coses bàsiques per sobreviure en el món de la docència. Ara ja els alumnes em puntuen millor a les enquestes, però em falta moltíssim (si es que podré arribar mai) per a la qualitat dels millors referents docents que he tingut des que vaig fer la carrera: el Miquel Llobera Sande, i com no, el Javier.

I finalment, vaig marxar de "Marie Curie" a Noruega, sota la direcció, en teoria, de Dag Aksnes, però a la pràctica, més sovint sota el guiatge d'Øyvind Fiksen; i una mica també de Jarl Giske i en Jens Nejstgaard. En especial estic molt agraït a l'Øyvind per la tutoria de la feina de la meva tesi, i que amb el seu feedback va evolucionar en les seves darreres passes. També vull agrair l'escalfor creada per tots al voltant dels "cavallers de la taula rodona", amb la Clelia Booman com a secretària incansable de totes les gestions relacionades amb el programa BATMARE que ens acollia als doctorands europeus (a través de les beques Marie Curie de que gaudien per ser centre d'excel·lència de la Unió Europea en recerca sobre ecologia marina). Va ser en els darrers 4 mesos de la meva estada amb ells que vam coincidir el Miquel Angel i jo per aquelles terres, i en concret, taula amb taula en el

mateix despatx fins i tot (qui ens ho hauria de dir :-). Gràcies també als companys de classes de Swing d'aquells mesos, que van fer que els llargs vespres-nits se'm fessin més curts, i hi hagués escalfor interna enmig de la foscor i el fred.

I d'aquesta època vull agrair especialment de nou a en Pere, per que va permetre molt amablement que guanyés el meu primer contracte com a professor a la universitat de Barcelona, el primer d'una sèrie de petits contractes que em van ajudar a obtenir posteriorment l'acreditació de professorat col·laborador, i en darrer terme, el contracte de 4 anys que he estat gaudint fins aquests dies en que diposito la tesi doctoral.

I vull agrair també el suport moral rebut per la gent actual del 3r cicle del departament d'Ecologia i alguns d'ells, també companys com a professorat novell del departament: Biel, Ainhoa, Eusebi, Julio, Manuel, Núria, Tura, Mireia, Blanca, Iraima, Cesc, Salva, Lola, Dani, Mireia, Neus, Rafa, Gonzalo, Jaime, Laia, Enric, ... I abans, el Fede, el Marc i la Teresa, el Rauquirio, l'Andrea (ai! com vam trobar a faltar els partits de futbol quan vas marxar), l'Enrique, el Chechu, el Jose Antonio, el Xavi (Lluch)... Entre el Xavi i la Marta em van ensenyar a fer els primer gràfics amb el "Surfrer"! (eh!, Marta :-) i el Corel Draw. Després, ja em vaig atrevir a continuar d'autodidacta amb aquests i altres programes que els seguirien. En fi, segur que em deixo molta gent, dels d'abans, i alguns dels d'ara: gràcies també per la vostra companyia.

I com no, la gent dels postgraus de docència universitària (la "púrria" del professorat novell de la UB! :-): Biel (de nou :-), Víctor, Francisco, Laura, Ivan, Berta, Mònica, Jorge, Marta, Mercè, ... Gràcies per compartir estones i reflexions al voltant de les tasques docents i de recerca com a professors novells i investigadors en formació.

També vull agrair a en Guillem Clapés, que m'iniciés en el tema de treballar també per millorar les condicions laborals del tercer cicle i dels que continuàvem fent tesis doctorals posteriorment. Gràcies a ell em vaig animar a "pringar" pels meus companys dels altres departaments de totes les facultats de Ciències Experimentals i Matemàtiques (l'antiga Divisió III) de la UB, en el seu Consell de Divisió. I d'allà, poc a poc a posar-me en contacte amb gent de la UPC i de l'UAB, per mirar de coordinar esforços de cara a treballar per dignificar la situació de la recerca a Catalunya, especialment en l'etapa de personal investigador en formació. A rel d'allà, es va començar a gestar "D-Recerca", aprofitant l'esforç previ fet per Juan Carlos Bayo i altres en crear Damndocs, la proto-associació per dignificar la situació dels "fotuts doctorands". La llista és llarga, de la gent amb qui em passar moltes hores junts fent reunions, planificant accions com manifestacions, tancades a universitats i centres de recerca, manifestos i cartes de recollides de signatures, ... i per que no, festes i celebracions vàries: Edu, Cesca, Marc, Octavi, Teresa, Ana, Héctor, Miquel (de Cáceres) i Miquel (Tusón), Jaume, Fede, ... I a nivell de tot l'estat espanyol (Federación de Jóvenes Investigadores – FJI/Precarios): Pastora, Roberto, Cesar, Toni (Galardón? :-), Marta, Cristina, Andrés, Raul ("Sólo se pierde la lucha que se abandona"), I si, al llarg d'aquests anys, s'han aconseguit moltes coses que no ens pensàvem, per

als propers doctorands que van venir després i que venen ara: pujada de sous de 100.000 a 160.000 ptes, contractes per als darrers dos anys de període finançat com a investigadors predoctorals (2 beca + 2 contracte), i després, en alguns casos, 1 beca + 3 contracte. L'estatut del personal investigador en formació, que després de tants anys, retorna els seus fruits fent que les universitats finalment hagin de reduir les hores de docència dels seus becaris de recerca i docència (o similars) a 60 hores a l'any (se'ls va acabar allò de fer servir els becaris com a professorat barat per cobrir la docència de les universitats). Contracte d'ajudant no doctor per 4 anys (en teoria ;-) amb només 60 hores de classes a l'any. És curiós el que hem après al llarg d'aquests anys de la tesi doctoral, de tasques relacionades més amb la gestió de la ciència, el disseny de la carrera investigadora, la política científica (la de grans reunions i comissions, i la de petites trobades de passadissos i dinars de treball en petit comitè). Gràcies també al Marius Rubiralta, i al Miquel Moretó, ambdós com a anteriors vicerectors de recerca de la UB, per confiar en les iniciatives que portàvem endavant doctorands de la UB per millorar les nostres condicions laborals i dels nostres companys.

Bé, em falta per donar l'agraïment al tècnic de la comunitat de regants de l'Hemidelta dret (no recordo el seu nom, i no me'l va posar en els arxius de dades que encara conservo), al Jordi Cunillera i Grañó, tècnic del Servei de Meteorologia, per facilitar-me dades i orientacions sobre les estacions meteorològiques del Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya. I dels serveis científico-tècnics de la UB, voldria agrair en especial a la Laia i la Pilar Teixidor, per que van tenir prou paciència amb la gent nova (i "novata") com jo. I a l'Isidre, per ser un exemple d'excel·lent combinació de parsimonia, rigor científic i tècnic i bon suport amable a investigadors novells.

Gràcies mil al Jordi Camp per la seva constant disposició a ajudar-me en tot allò relacionat amb la tesi doctoral. Primer, com a co-investigador principal del projecte de les anòxies, juntament amb el Javier. I després, com a co-director, en acceptar la proposta que li vaig fer, amb el vist-i-plau del Javier. Vull agrair també l'ajuda rebuda per part de la gent de l'ICM en els primers anys de campanyes (sobre tot, la Mercedes Masó), i del Maxi Delgado en assessorar-me diverses vegades per correu-e sobre el fitoplàncton a la badia dels Alfacs.

Gràcies també a l'Albert Solé Sabaté, per les seves pautes clares i ràpides per ajudar-me a aprendre a compilar exitosament el meu codi fortran sota programari lliure (GNU Fortran). No et pots ni imaginar Albert, el que em va suposar la teva ajuda, després de més de dos anys de no saber per on encarar el tema per aconseguir-ho, un cop ja havia entès la importància de poder alliberar el codi amb programari lliure, i que fos compilable també amb eines lliures com les del projecte GNU.

Indirectament em sento molt agraït també amb totes les persones de les comunitats de programari lliure que han desenvolupat o documentat les següents eines que per una o altra raó he emprat en algun moment per realitzar aquesta tesi doctoral:

- Entorn de programació i utilitats per gestionar codi font: GNU Fortran, Source-highlight,
- Visualització de dades: R-project, RKWard, SciViews
- Dibuix vectorial: Inkscape, OpenOffice Draw

- Edició d'imatges: GIMP
- Generació de pdf: OpenOffice, PdfCreator.
- Sistema operatiu: GNU/Linux, Ubuntu, Fedora, Slax
- Internet i correu-e: Firefox, Thunderbird, Mozilla SeaMonkey

Gràcies també per la paciència amb mi durant aquest temps (llarg) de “*estic en procés d'acabar la tesi doctoral*”. Gràcies als meus pares, germans i resta de família, als companys de Sant Pau del Camp (Paloma, Agus, Oscar, Ana, Chema, Imma, Ernest, Maya, Yolanda, Rosa, Xavi Gine, les quatre Martes, ...), la gent de Sant Pere Claver (Josemi, Carme, Maite, Jordi, Pep, David, Dani, Jaime, Albert...). I a la gent del Camp de treball (què feu llegint aquesta tesi! Lo vostre és moral...: Carles, Laia, Mariajo i Mikel, Unai, Marta, Laura, Susana, Andreu, Angels, Bet, Ester i Erik, Montse i Eneko...). I tota la gent de “diàspora” que en un o altre moment us preocupàveu per l'evolució de la meua tesi doctoral. Us he de confesar que durant molts anys he perdut la iniciativa de quedar per xerrar una estona per que, en part, em feia pal haver de tornar a passar un cop més (durant anys) per que em preguntéssiu per la tesi doctoral, i haver de respondre el de sempre “*No, encara no; ja falta poc, però encara falta, sembla*”... Sembla mentida com m'ha influït això en el meu caràcter d'ençà que es va acabar la beca però no la tesi....

No voldria acabar sense agrair també a les institucions pel finançament rebut. Al Ministeri d'Educació i Ciència, per la beca de "Formació de Professorat Universitari" - FPU, entre 1996 i 1999. A la Universitat de Barcelona per la borsa de viatge per assistir a un Congrés a Sud-àfrica el 1997. A la Unió Europea, per la beca Marie Curie rebuda per fer una estada de recerca a Noruega durant 7 mesos el 2002. I a la Generalitat de Catalunya pel finançament per assistir a una edició de les Jornades Doctorals de Catalunya de 2007.

Ara si, per acabar, vull agrair l'enorme paciència i carinyo que la Gloria ha tingut amb mi durant els darrers anys que portem junts i jo he estat “missing” de forma física i psicològica per causa de la tesi. Per sort, com més temps ha passat, més ha entès el molt que significava per a mi (sobre tot psicològicament) arribar al final de la tesi. Moltes són les coses que vaig deixar aparcades els primers anys quan em vaig quedar sense beca, per tal de poder dedicar-me al màxim de cos i cap a enllestir la tesi com abans millor. I des de principis de 2003, ja van ser moltes menys les coses que vaig deixar aparcades (just després ens vam conèixer), però tot i així, sempre he tingut un remanent al cap que m'ha pesat molt anímicament. Gràcies Gloria per creure també en mi i acompanyar-me en tot aquest procés, que de vegades ha estat dur, i altres, molt enriquidor i festiu per als dos.

Introducció

Introducció

Els sistemes estuaris són dominis d'aigua costanera semiconfinada, que tenen una connexió lliure amb el mar, i on l'aigua de mar es dilueix amb l'aigua dolça procedent del desguàs continental (Pritchard 1952, Pritchard 1967, Cameron i Pritchard 1965). En ells existeix confluència de matèria i energia de diferents orígens, que dona lloc a l'existència de forts gradients i ecotons, així com una alta variabilitat en les condicions ambientals (Ketchum 1983a). Per això presenten característiques afins, en part, a totes dues zones que els limiten geogràficament, a part d'altres peculiaritats pròpies. Algunes d'aquestes peculiaritats pròpies són comuns a tots els estuaris arreu del món, com la seva alta producció biològica respecte la majoria d'altres sistemes de la Terra; altres peculiaritats són específiques per les condicions locals d'aquell indret en concret (Ketchum 1983b, Valiela 1995).

La Badia dels Alfacs és un sistema estuarià influït per l'absència de marees notables, com passa en alguns altres sistemes estuaris mediterranis del món. El present treball s'emmarca en la línia de tota una sèrie de treballs realitzats en aquesta badia, per tal de conèixer millor la seva dinàmica, les similituds i diferències respecte altres sistemes estuaris del món, i molt especialment esbrinar els mecanismes que controlen les concentracions d'oxigen dissolt i les seves fluctuacions.

Antecedents

L'any 1984 es va encetar un programa d'estudi de Delta de l'Ebre com a sistema integrat d'ecosistemes terrestres, d'aigua dolça, salabrosa i marina, per tal de començar a establir relacions quantitatives de fluxos de matèria entre ells i estimar les produccions de cada sector ("Estudio integrado del delta del Ebro. Factores determinantes de la producción biológica". CICYT-PAC 84-0016-C02). S'han publicat, des de llavors, algunes tesis sobre aspectes relacionats amb el Delta de l'Ebre (Ibáñez 1993, Carrillo 2002 i Movellán 2004, sobre diferents aspectes físics o químics del tram estuarià de l'Ebre; Muñoz 1990, sobre la limnologia de la part baixa de l'Ebre i els canals de rec; Forés 1989, Astorga 1998, Novella 1998 i Peña 2003, sobre diferents aspectes relacionats amb els arrossars; Menéndez 1990, sobre macròfits submergits de llacunes costaneres i García 2001 sobre els seus sediments; Arcos 2001 sobre ocells i pesqueres) i altres més específics en la Badia dels Alfacs (Delgado 1986, sobre el fitoplàncton; Pérez 1989, sobre les fanerògames marines; Martínez 1990, sobre les macroalgues; Vidal 1991, sobre la interfase sediment - aigua; Camp 1994, sobre la dinàmica ecològica integrada de la badia; i Garcés 1998, sobre el plàncton tòxic).

Des dels primers estudis fins als darrers, s'han vingut observant alguns fenòmens de dèficit d'oxigen dissolt a la part més interior i profunda de la badia dels Alfacs (Camp 1994). Una de les hipòtesis inicials contemplava que el bentos del cos central de la badia era en conjunt consumidor net d'oxigen, i que part de la matèria orgànica produïda per macròfits marins a les plataformes podia descompondre's a prop o a dins del cos central de la badia (J. Camp, *com. pers.*). Aquests factors juntament amb les altes temperatures estivals, baixa freqüència de fronts atmosfèrics amb capacitat de barrejar la columna d'aigua i polsos productius del fitoplàncton podien potenciar les desaparicions

locals d'oxigen a la capa fonda. Amb aquest marc conceptual es va iniciar el projecte de recerca de la CICYT en el qual s'emmarca la present tesi: "Episodios de Anoxia en bahías estuáricas mediterráneas: generación, mantenimiento y consecuencias" (AMB95-0171-C02-02). En realitzar les primers campanyes vam observar que la badia estava coberta per macroalgues bentòniques, i a mesura que vam repetir més campanyes en mesos successius vam poder constatar que no eren acúmuls puntuals de macroalgues arrossegades pels corrents, sinó que aquestes es trobaven de forma permanent a la badia, i que fins i tot presentaven unes cobertures pràcticament totals del seu fons. Des de llavors, vam incloure les macroalgues en el punt de mira de les nostres investigacions, atès que el seu paper podia haver passat de ser marginal en anys previs a fonamental per entendre la dinàmica de l'oxigen de l'ecosistema en el final dels 90.

Dèficits d'oxigen dissolt

En aquest treball s'han fet servir conceptes com "hipòxia" o "anòxia" per referir-se a situacions de dèficit d'oxigen dissolt a l'aigua. Convé aclarir des del principi quan parlarem dels primers i quan dels segons, i quines són les característiques principals i conseqüències que poden tenir aquests dèficits en sistemes marins costaners, que poden anar des de les petites modificacions biogeoquímiques en hipòxies lleus, fins els canvis substancials a mig/llarg termini en l'ecosistema en casos d'anòxies severes i persistents.

Terminologia

Hipòxia significa, estrictament, les condicions de concentració d'oxigen menors que les de saturació amb l'aire, altrament anomenades condicions de "normòxia" (Jørgensen i Richardson 1996). A la pràctica, el terme hipòxia s'assigna a valors en el rang baix de concentracions d'oxigen dissolt (OD), com valors inferiors a $3 \text{ mgO}_2 \text{ l}^{-1}$ (Turner i Allen 1972, May 1973, Kuo i Neilson 1987, HELCOM 1990), o a $2 \text{ mgO}_2 \text{ l}^{-1}$ (Foote 1983, Stuntz *et al.* 1982, Pokryfki i Randall 1987, Breitburg 1990, Summers i Engle 1993, Bierman *et al.* 1994, Dortch *et al.* 1994), a causa d'efectes demostrats sobre la fauna sota aquestes concentracions (Pihl *et al.* 1991).

Pel contrari, "anòxia" ha estat tradicionalment assignada a condicions de $0 \text{ mgO}_2 \text{ l}^{-1}$, tal i com el seu nom fa referència (*an-oxia*, és a dir, sense oxigen). No obstant, la literatura està plena de criteris lleugerament diferents segons els autors per acotar els límits d'aquests dos conceptes, alguns dels quals es comenten a continuació.

Diaz i Rosenberg (1995) van considerar a la seva revisió els dos termes hipòxia i anòxia per definir ambients amb poc oxigen. Aquests són els termes més àmpliament utilitzats a la literatura ecològica i fisiològica. Ells consideren que hipòxia comença a 2.0 ml l^{-1} d'oxigen (2.8 mg l^{-1}) i s'estén fins a 0.0 ml l^{-1} , el punt d'anòxia ¹. Per habitats marins o estuaris les concentracions més freqüents d'oxigen

¹ Equivalències aproximades per comparació amb altres unitats d'oxigen, a 20 psu (practical salinity units, equivalent aproximadament a g l^{-1} ó ‰), 25°C i 1 atmosfera de pressió: $1 \text{ ml l}^{-1} = 1.4 \text{ mg l}^{-1} = 1.4$

dissolt oscil·len entre lleugerament per sobre de 100% de saturació (prop de 8-10 ml l⁻¹), i per sota de 40% (fins a 2.0 ml l⁻¹). Per a la seva revisió ells consideren aquest rang com a normòxia. Malgrat això, ells defineixen uns rangs de valors específics més detallats pel que fa a la successió de comunitats bentòniques i la seva variabilitat (Figura 0.1).

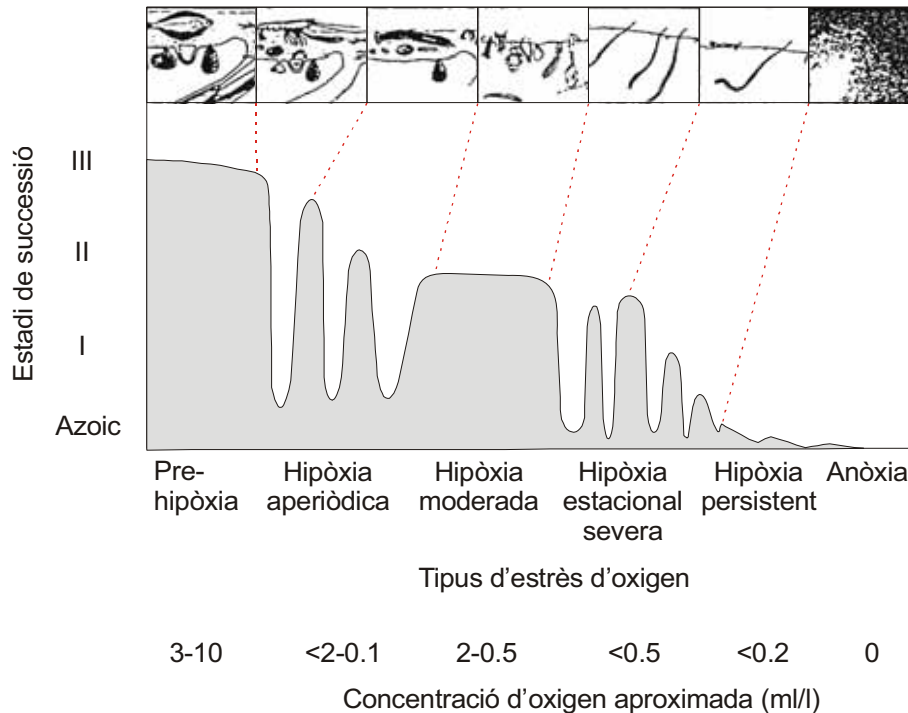


Figura 0.1 Model conceptual sobre com interacciona la hipòxia amb els estadis de successió o la complexitat de l'organització de la comunitat (modificat a partir de Diaz i Rosenberg 1995). L'estadi III és una comunitat madura, l'estadi II és una comunitat transitòria i l'estadi I una comunitat pionera o oportunista (estadis de successió segons Rhoads i Germano 1986). L'escala de temps és relativa, amb l'interval de temps per a la davallada progressiva de l'ecosistema essent depenent del sistema, però els sistemes estudiats per Diaz i Rosenberg (1995) segueixen aquest mateix patró general.

Pel que fa referència a la present tesi doctoral, es va considerar anòxia de 0 a 1 mg l⁻¹ i hipòxia d'1 a 3 mg l⁻¹, per ser aquest el valor sencer més proper en mg l⁻¹ al de la revisió de Diaz i Rosenberg. Com l'esgotament d'oxigen no segueix una caiguda lineal sinó una evolució exponencial negativa en els valors més baixos de concentració d'oxigen, considerem arbitràriament que quan l'oxigen dissolt arriba a valors sota 1 mg l⁻¹, ja pot ser considerat pràcticament com un episodi anòxic en el sistema.

Conseqüències

Els esgotaments parcials o totals d'oxigen poden tenir un impacte significatiu tant en aspectes purament ecològics com en sectors socio-econòmics. Des de l'òptica ecològica trobem una sèrie de repercussions que, tot i que depenen tant de la seva freqüència d'aparició com de la seva intensitat, afecten en general a les característiques físico-químiques de l'aigua, a la biogeoquímica del sediment,

ppm = 23.9 mm Hg = 23.9 torr = 3.18 kPa = 45.7 mM = 89.3 mg-at l⁻¹ = 4.3 %O₂ vol. = 14 % a saturació amb l'aire.

a les poblacions d'organismes i l'estructura de la comunitat, i també als fluxos d'energia de l'ecosistema i a la successió ecològica (veure "Annex A. Conseqüències de les davallades d'oxigen").

Objectius de la tesi

Tenint en compte tot l'exposat anteriorment, l'objectiu general de la tesi és entendre millor la dinàmica d'oxigen dissolt de la badia dels Alfacs, com un exemple de badia estuariana sense mareas importants, per tal d'esbrinar quines poden ser les causes de les davallades d'oxigen esporàdicament detectades en aquesta badia. A l'hora, es pretén conèixer el grau d'importància de cadascuna d'aquestes causes per modificar la concentració d'oxigen dissolt de la columna d'aigua. Entre les causes possibles es troben les relatives a canvis en la hidrodinàmica de les masses d'aigua de la badia, o bé a canvis interanuals d'algunes característiques físico-químiques de l'aigua (temperatura, salinitat, regim lumínic, concentracions de nutrients, ...), a la seva vegada, potencialment relacionades amb possibles canvis de la climatologia en els darrers anys (temperatura, irradiància, vent, ...). I la causa pot estar relacionada amb canvis, a l'hora, de les poblacions d'organismes (plàncton, bentos, ... especialment els fotosintètics, malgrat no només).

Com a objectius secundaris es troben entendre millor el paper dels aportos d'aigua dolça i el vent a la badia per contrarestar els efectes d'eventuals balanços d'oxigen negatius a causa dels organismes, descriure amb més detall un fenomen d'hipòxia a la badia, i situar la badia dels Alfacs en un context més ampli d'estuaris o badies estuarianes d'arreu del món.

Estructura de la tesi

Així, els objectius esmentats van portar a estructurar la tesi de la següent manera. En el Capítol 1 es fa un repàs de les qüestions importants sobre la **hidrodinàmica** de badies i estuaris, i s'analitzen algunes de les **característiques específiques de la badia dels Alfacs** en aquest àmbit, que poden tenir molta influència sobre l'aparició (o finalització) de les davallades d'oxigen.

Convé saber també si aquestes alteracions dels valors normòxics poden ser conseqüència d'algun canvi subjacent de les **condicions climatològiques** de la badia així com d'una possible evolució de les **característiques físico-químiques de l'aigua** de la Badia de l'última dècada. Aquests aspectes són abordats en el Capítol 2.

Els períodes hipòxics de la Badia dels Alfacs s'han pogut descriure poques vegades amb prou dades de camp. La primera vegada (detectada) va ser el 1990 en què es va descriure amb certa cobertura espacial l'aparició, evolució i acabament d'un període d'hipòxia de la badia, però encara amb algunes llacunes sobre l'evolució temporal més fina d'aquesta davallada, per exemple. Durant l'any 1997 es va poder cobrir una segona **descripció detallada d'un episodi d'hipòxia** amb la distribució espacial i la cobertura temporal a escala fina, i això queda recollit en el Capítol 3.

Ara bé, un cop ja sabem com són els episodis d'hipòxia, caldrà veure quin paper tenen el metabolisme d'oxigen del plàncton i del bentos en la badia. L'ordre de magnitud de la **contribució del plàncton i altres processos de la columna d'aigua** s'analitza en el Capítol 4, a partir de dades bibliogràfiques, mesures de camp de canvis diaris de concentració d'oxigen en la columna d'aigua i mesures de laboratori de DBO_5 . El **bentos**, per altra banda, s'analitza en el Capítol 5, posant especial atenció al paper de les **macroalgues bentòniques** en el balanç d' O_2 de l'ecosistema després de la seva colonització del fons de la Badia durant l'última dècada.

Finalment s'ha integrat molts dels resultats previs en el Capítol 6 per fer càlculs de **balanços d'oxigen globals de l'ecosistema** a escala mensual o superior, a través d'un model numèric desenvolupat en el marc de la present tesi (OMMEL, Annex D). Amb aquesta eina de càlcul de balanços s'han investigat les contribucions parcials dels diferents components físics i biològics de l'ecosistema per un costat, i del plàncton i del bentos, per l'altre. Això ha servit alhora, per fer una anàlisi comparativa i elucidar la diferent sensibilitat de l'ecosistema a canvis en alguns dels paràmetres ambientals, amb especial èmfasi en el període d'hipòxia observat el 1997.

I per acabar, s'ha fet un **resum sintètic de les conclusions** més importants (Capítol 7) que es poden extreure de cada capítol, incloent algunes de les qüestions no resoltes importants que poden donar lloc a un treball posterior de recerca.

Bibliografia

- Arcos, J. M., 2001. Foraging Ecology of Seabirds at Sea: Significance of Commercial Fisheries in the NW Mediterranean. Ph.D., pp., *Biologia Animal*, Barcelona.
- Astorga, V., 1998. La desnitrificación en humedales mediterráneos: el Delta del Ebro. Ph.D., 228 pp., *Ecología*, Barcelona.
- Bierman, V. J. J., et al., 1994. A preliminary Mass Balance Model of Primary Productivity and Dissolved Oxygen in the Mississippi River Plume/Inner Gulf Shelf Region. *Estuaries*, 17 (4): 886-899.
- Breitburg, D. L., 1990. Near shore hypoxia in the Chesapeake Bay: patterns and relationships among physical factors. *Est. Coast. Shelf Sci.*, 30 593-609.
- Cameron, W. M. i Pritchard, D. W., 1965. "Estuaries", a *The Sea, II*, pp. 306-324. Wiley and Sons, New York.
- Camp, J., 1994. Aproximaciones a la dinámica ecológica de una bahía estuárica mediterránea. Doctoral, 245 pp., Barcelona.
- Carrillo, J. A., 2002. Influencia de la turbulencia y de la Dinámica de Interfases de Densidad sobre Organismos Planctónicos."Aplicación al estuario del Ebro". Ph.D., pp., *Enginyeria hidràulica marítima i ambiental*, Politècnica de Barcelona.
- Delgado, M., 1986. Ecología de diatomeas costeras. Relación Pláncton-Bentos. Doctoral, 261 pp., *Departamento de Ecología*, Universidad de Barcelona.
- Diaz, R. J. i Rosenberg, R., 1995. Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and Marine Biology - An Annual Review*, 33 245-303.
- Dortch, Q., et al., 1994. Respiration rates and hypoxia on the Louisiana shelf. *Estuaries*, 17 (4): 862-872.
- Foote, K., 1983. Observations of oxygen depletion in Louisiana Offshore Waters. *3rd Annu. Gulf Mex. Inf. Transfer Meeting*: 185-186.

- Forés, E., 1989. Cicles del nitrogen i del fòsfor en el sistema dels arrosars del delta de l'Ebre. Ph.D., pp., *Ecologia*, Barcelona.
- Garcés, E., 1998. Proliferacions de dinoflagel·lades a la Costa Catalana: estudi del creixement *in situ* i adaptacions per al manteniment. 269 pp., *Departament d'Ecologia*, Universitat de Barcelona.
- García, M. C., 2001. Papel de la interfase sedimento-agua en el reciclado de nutrientes en zonas húmedas. Ph.D., pp., *Ecologia*, Barcelona.
- HELCOM, 1990. Second periodic assessment of the state of the marine environment of the Baltic Sea 1984-1988. *Balt. Sea. Envir. Proc.*, 35B: 432.
- Ibáñez, C., 1993. Dinàmica hidrològica i funcionament ecològic del tram estuari del riu Ebre. Tesi doctoral, pp., *Ecologia*, Barcelona.
- Jørgensen, B. B. i Richardson, K., 1996. Eutrophication in Coastal Marine Ecosystems. *Coastal and Estuarine Studies*, 52: 273.
- Ketchum, B. H., 1983a. Estuaries and enclosed seas. *Ecosystems of the world*, 26: XII, 500 s.
- Ketchum, B. H., 1983b. "Estuarine characteristics", a *Estuaries and Enclosed Seas*, 26, 1-14. Elsevier, Amsterdam.
- Kuo, A. Y. i Neilson, B. J., 1987. Hypoxia and salinity in Virginia estuaries. *Estuaries*, 10 (4): 277-283.
- Martínez, A., 1990. Estudio ecológico de las algas efemerofíceas: papel en los flujos de materia y energía en un sistema estuárico (Bahía de los Alfaques, Delta del Ebro, España). Ph. D. Thesis, 166 pp., *Departamento de Ecología*, Universidad de Barcelona.
- May, E. B., 1973. Extensive oxygen depletion in Mobile Bay, Alabama. *Limnol. Oceanogr.*, 18 353-366.
- Menéndez, M., 1990. Ecología de los macrófitos enraizados sumergidos en la laguna de la Tancada (Delta del Ebro, NE. España). Ph.D., 240 pp., *Ecologia*, Barcelona.
- Movellán, E., 2004. Modelado de la cuña salina y del flujo de nutrientes en el tramo estuarino del río Ebro. Ph.D., pp., *Ecology*, Barcelona.
- Muñoz, I., 1990. Limnología de la part baixa del riu Ebro i els canals de reg: els factors físico-químics, el fitoplancton i els macroinvertebrats bentònics. Doctoral, pp., Barcelona.

- Novella, E., 1998. Reciclat dels residus agrícoles en els arrossars del delta de l'Ebre: aproximació a una agricultura sostenible. Ph.D., 296 pp., *Ecologia*, Barcelona.
- Peña, s., 2003. Estudio y modulación del metabolismo del glutatión en la tolerancia al estrés oxidativo generado por plaguicidas en organismos acuáticos de interés comercial. Ph.D., pp., *Bioquímica i biología molecular*, Valencia.
- Pérez, M., 1989. Fanerógamas marinas en sistemas estuáricos: producción primaria, factores limitantes y algunos aspectos del ciclo de nutrientes. Doctoral, pp., Barcelona.
- Pihl, L., *et al.*, 1991. Effects of periodic hypoxia on distribution of demersal fish and crustaceans. *Mar. Biol.*, 108 349-360.
- Pokryfki, L. i Randall, R. E., 1987. Nearshore hypoxia in the bottom water of the Northwestern Gulf of Mexico from 1981 to 1984. *Mar. Environ. Res.*, 22 75-90.
- Pritchard, D. W., 1952. Estuarine hydrography. *Adv. Geophys.*, 1 243-280.
- Pritchard, D. W., 1967. "Observations in circulation of coastal plain estuaries", a *Estuaries*, 83, 37-44. Am. Assoc. Adv. Sci.,
- Rhoads, D. C. i Germano, J. D., 1986. Interpreting long-term changes in benthic community structure: a new protocol. *Hydrobiologica*, 142 291-308.
- Stuntz, W. E., *et al.*, 1982. Area of hypoxic bottom water found in the Northern Gulf of Mexico. *Coastal Oceanography and Climatology News*, 4 37-38.
- Summers, J. K. i Engle, V. D., 1993. Evaluation of sampling strategies to characterize dissolved oxygen conditions in northern Gulf of Mexico estuaries. *Environ. Monit. Assess.*, 24 (3): 219-229.
- Turner, R. E. i Allen, R. L., 1972. Bottom water oxygen concentration in the Mississippi River Delta Bight. *Contr. Mar. Sci.*, 25 161-172.
- Valiela, I., 1995. *Marine Ecological Processes*:
- Vidal, M., 1991. Estudios sobre la dinámica de nutrientes en sistemas estuáricos: flujos de sedimento-agua de nutrientes y oxígeno. Ph. D., 305 pp., *Departamento de Ecología*, Universidad de Barcelona.

