

Departament d'Ecologia  
Universitat de Barcelona

**Ter River influence on Sau Reservoir limnology  
Empirical and watershed-scale modeling**

La influència del riu Ter en la limnologia de l'embassament de Sau  
Modelització empírica i a escala de conca

**Rafael Marcé Romero**



**TESI DOCTORAL**  
Departament d'Ecologia  
Universitat de Barcelona  
Programa de doctorat: Ecologia Fonamental i Aplicada  
Bienni 2000–2002

**Ter River influence on Sau Reservoir limnology  
Empirical and watershed-scale modeling**

Memòria presentada per Rafael Marcé Romero per optar al grau de Doctor per la  
Universitat de Barcelona

Rafael Marcé Romero  
Barcelona, a 26 de març de 2007

Vist i plau del director de la Tesi  
Dr. Joan Armengol Bachero  
Catedràtic del Departament d'Ecologia  
Universitat de Barcelona



---

# Pròleg

---

Quan finalment s'enllesteix la redacció d'una Tesi Doctoral i tota la feina prèvia que això implica és quan un se n'adona del veritable mèrit de tota persona amb grau de Doctor: un dia va haver d'acabar una Tesi. Sembla obvi, però no ho és del cert fins que s'ha passat aquest tràngol. I és que finalitzar una Tesi no és només agafar allò que tens a sobre de la taula i posar-ho negre sobre blanc. Vol dir un munt de coses més, des d'agafar l'escopeta i començar a fer caure la majoria dels coloms que un s'ha dedicat a fer volar durant anys malgrat els savis avisos del seu director de Tesi, fins acceptar que, de fet, això de la Tesi és un treball de formació.

I és que fer una Tesi vol dir bàsicament això: aprendre de què va exactament això de fer ciència. Malauradament, fent aquest camí es perd una visió pot ser romàntica o pot ser ingènua de la recerca. I és que un aviat se n'adona que les presses i pressions de la Tesi només són el primer plat, ja que a la nostra generació ens han canviat la carrera científica per la *cursa* científica.

En definitiva, aquestes pàgines són el resultat de sis anys de recerca, encara que no tots ocupats íntegrament a investigacions directament relacionades amb el contingut d'aquesta Tesi. Hem intentat incloure sempre que ens ha estat possible i hem sigut capaços una visió original del tema que tractàvem. Això ha implicat, especialment en la segona part de la Tesi, entrar a fons en temes que no són propis de l'Ecologia, però que vàrem considerar importants, i que l'esforç pagava la pena.

Haig d'agrair sincerament l'ajuda prestada i el temps dedicat per moltes persones durant aquest anys, especialment al Dr. Joan Armengol, que ha dirigit aquesta Tesi. Li agraeixo de forma particular la franquesa amb que sempre m'ha tractat, i la confiança que va anar dipositant en les meves propostes. Aquesta franquesa també l'aplicà sempre que calia treure'm del cap alguna insensatesa, cosa que ara li agraeixo de tot cor. La Tesi s'ha beneficiat molt de l'àmplia visió de la limnologia que té en Joan. I també li vull reconèixer l'interès i preocupació que sempre mostra pels membres del seu equip de treball. Només com a exemple, el seu esforç ha permès que jo pogués demorar dos anys més dels previstos la redacció d'aquest treball.

Dues persones són culpables de que estigui intentant dedicar-me a això de la recerca: la Marta Comerma i en Juan Carlos García. Ells em van transmetre la il·lusió i rigor amb que treballaven, i això em va fer decidir a intentar-ho. Amb en Constantin Cazacu vaig compartir els primers mesos de la Tesi, quan tot és un fer bullir l'olla que ell s'encarregava d'omplir amb idees i més idees. El Capítol 1 de la Tesi és conseqüència directa d'això. La Claudia Feijoó també em va ajudar molt al principi. La Mary Gallegos va començar de tècnica al laboratori poc després de començar jo la Tesi, i m'ha ajudat tant que pràcticament l'hauria de signar amb mi. Amb el Jaime i el Gonzalo tinc un gran deute per la comprensió que han tingut durant aquest darrer any i escaig, en el que ells han hagut de fer-se càrrec de molta feina que em pertocava. Amb l'Enrique

Moreno (menos Ostos) he compartit el darrers dos anys de Tesi, en els que m'he beneficiat de les seves idees i capacitat de treball. La seva ajuda amb els materials de la primera part de la Tesi ha sigut fonamental. La Pilar López m'ha ajudat molt durant el darrer any de la Tesi, especialment amb els capítols de la primera part.

Aquesta Tesi es basa en moltes dades que no he recollit jo. Vull esmentar de forma destacada el treball d'Antoni Vidal, que va treballar durant trenta anys a l'embassament de Sau. Això s'ha de fer extensiu a l'empresa d'abastament Aigües Ter Llobregat (ATLL), que sempre s'ha mostrat interessada en els nostres suggeriments, i que ens ha permès accedir als arxius de l'Antoni Vidal. Moltes dades d'aquesta Tesi procedeixen del programa de seguiment limnològic que financia ATLL. També voldria agrair aquí l'ajuda d'Antoni Gàzquez, del Servei Meteorològic de Catalunya, i de Lluís Godé, de l'Agència Catalana de l'Aigua. Algunes dades de l'embassament de Foix són fruit de l'esforç del Dr. David Balayla.

Per fer la Tesi vaig gaudir d'una beca predoctoral del Programa de Formación de Profesorado Universitario, del Ministerio de Educación, Cultura y Deportes, que em va permetre fer dues estades al USACE amb en Carlos E. Ruiz, a qui haig d'agrair que em fés sentir com a casa ni més ni menys que a Mississipi. En Robert Kennedy em va encoratjar amb els models de conca, sempre m'ha ajudat en tot el que ha pogut, i en les poques ocasions que hem coincidit personalment, m'ha tractat com un veritable amic. La Dolors Planas em va convidar a anar a Montreal, on em va fer poc menys que de mare i on vaig tenir la sort de gaudir de l'extraordinari ambient científic que es respira a la ciutat. Allà en Jérôme Marty, Serge Paquet i tota la gent del GEOTOP em van ajudar moltíssim. A més de la beca, aquesta Tesi s'ha beneficiat de diferents contractes finançats per institucions públiques: el contracte N62558-02-M-6007 de l'European Research Office de l'US Army, i els projectes REN2001-2185-CO2-O2/HID i CGL2004-05503-CO2-01 del Ministerio de Educación y Ciencia.

Pel que fa al Departament voldria esmentar tothom, però no ho podré fer sense oblidar algú. Tot i així, no voldria deixar d'esmentar la Susana Bernal, amb qui he compartit molts bons moments, i que segurament és l'única persona del Departament que ha hagut d'aguantar-me els dolents. A veure si en un futur podem treballar en alguna cosa plegats, perquè després d'explicar-nos les Tesis durant anys, té tela que no tinguem ni un arxiu EXCEL amb dades d'alguna idea compartida. També vull esmentar la Bet Vilalta, que va passar pel nostre costat com un coet. Voldria agrair els bons moments a l'Eusebi, el Biel, l'Ainhoa, la Rosa, la Mireia, el Julio, la Marta, el Luciano, la Tura, el Vicenç, el Salva, el Manuel, el Xavi de Pedro, l'Olga, a tota la meva generació del DEA encara no esmentats, i moltíssima altra gent que perdonarà la meva mandra i el meu oblit.

Altres persones vinculades al Departament o altres centres de recerca han proposat idees, o si més no sempre han tingut un moment per escoltar-me. Voldria esmentar Fede Bartomeus, Guillermo Mendoza, Andrea Butturini, Francisco Rueda, Joan Luís Riera, Santi Sabaté, Jaume Piera, Josep Anton Morguí, Xavier Rodó, Joan Gomà, i tots els integrants del grup de recerca FLUMEN.

Aquesta aventura no hagués sigut el mateix sense la companyia de gent com el Miquel Àngel Rodríguez, l'Esther Gaya, el Miquel de Càceres, el Pere Renom i el Quique Navarro. Amb ells he après moltes coses, i he gaudit d'innombrables converses sense que perdessin la paciència amb mi, que no és difícil. Espero que la *cursa* científica no ens impedeixi retrobar-nos tots junts sovint. Al Miquel Àngel li haig d'agrair de manera particular totes les hores que ha hagut d'aguantar escoltant històries al voltant d'aquesta Tesi, encara que en gran part ja li vaig pagar deixant-me guanyar de tant en tant a l'esquaix...

Tot el temps que aquesta Tesi s'ha emportat ha generat un deute enorme amb molta gent. Voldria esmentar especialment Lucas Bolado, Nacho Pons, Jaume Puigagut, Cesc Fortea, Josep Aniol Esteban i Jordi Peig, que malgrat la meva nefasta costum de no agafar mai el telèfon per trucar sempre han tingut un moment per mi si ho he necessitat.

Els meus pares i els meus germans i germanes sempre s'han preguntat què era exactament el que feia.

Espero que aquesta Tesi els ajudi a fer-se'n una idea. La Tesi també s'ha emportat un munt de temps que els hi corresponia. Els meus pares i els meus germans i germanes grans sempre varen acceptar que treballés unes hores menys allà al taller de vidre per intentar l'aventura de la Tesi. Tenint en compte que molts d'ells van haver de renunciar als seus estudis quan les coses no eren tan fàcils, podríem dir que aquesta Tesi ha sigut de fet un esforç familiar corporatiu. A aquest esforç familiar es va afegir des del principi de la Tesi la meva nova família a Berga. També espero que aquesta Tesi els ajudi a entendre en què dimonis he estat ocupat tot aquest temps, en el que el seu suport en molts moments ha sigut fonamental.

A la Núria li dec tantes coses que qualsevol enumeració que pogués escriure ara aquí seria una injustícia. La seva generositat sense límits ha fet possible aquesta Tesi, que vaig començar a l'hora que començàvem plegats, i que això fós compatible amb l'arribada de la Mariona i de l'Àssua. Es necessitaria molta més traça que la que tinc per poder expressar el meu sentiment de deute per tota l'atenció que aquest doctorat li ha manllevat. Tampoc li vull dedicar aquesta Tesi, perquè el que realment tinc ganes de dedicar-li és tot el meu temps.

Barcelona, 26 de març de 2007





---

# Contents

---

<b>Resum</b>	<b>3</b>
<b>0 General introduction</b>	<b>25</b>
Reservoirs in the global . . . . .	26
Dynamic models in the context of reservoir limnology . . . . .	27
Sau Reservoir-Ter Watershed system . . . . .	28
Objectives of this study . . . . .	30
Remarks on data acquisition and thesis structure . . . . .	31
<b>I RIVER INFLUENCE ON RESERVOIR LIMNOLOGY</b>	<b>35</b>
<b>1 A neuro-fuzzy modeling tool to estimate fluvial nutrient loads in watersheds under time-varying human impact</b>	<b>37</b>
1.1 Introduction . . . . .	37
1.2 Materials and Procedures . . . . .	39
1.2.1 Materials . . . . .	39
Ter River watershed: eutrophication of Sau Reservoir . . . . .	39
Mississippi watershed: hypoxia in the Gulf of Mexico . . . . .	40
1.2.2 Procedures . . . . .	40
FLUX software . . . . .	40
Multivariate rating curve . . . . .	42
Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System . . . . .	42
ANFIS implementation . . . . .	43
1.3 Assessment . . . . .	45
1.3.1 Nutrient concentration time-series comparison . . . . .	45
1.3.2 Nutrient load time-series comparison . . . . .	46
1.3.3 Performance of the ANFIS estimation . . . . .	47
1.3.4 Ecological interpretation of ANFIS parameters . . . . .	48
1.4 Discussion . . . . .	51

**x** CONTENTS

1.5	Comments and Recommendations . . . . .	52
<b>2</b>	<b>The role of river inputs on the hypolimnetic chemistry of a productive reservoir: implications for management of anoxia and total phosphorus internal loading</b>	<b>55</b>
2.1	Introduction . . . . .	55
2.2	Materials and Methods . . . . .	57
2.2.1	Study site . . . . .	57
2.2.2	Methods . . . . .	58
2.3	Results . . . . .	60
2.3.1	The temporal development of the river load to Sau Reservoir . . . . .	60
2.3.2	Hypolimnion chemistry influenced by the river . . . . .	62
2.4	Discussion and Conclusions . . . . .	65
<b>3</b>	<b>The role of allochthonous inputs of dissolved organic carbon on the hypolimnetic oxygen content of reservoirs</b>	<b>69</b>
3.1	Introduction . . . . .	69
3.2	Materials and Methods . . . . .	71
3.2.1	Study sites . . . . .	71
3.2.2	Chloride as a proxy of labile <i>DOC</i> . . . . .	71
3.2.3	Data collection . . . . .	74
3.2.4	Empirical regressions with hypolimnetic oxygen . . . . .	75
3.2.5	Oxygen consumption in the hypolimnion as a first order process . . . . .	75
3.2.6	Anoxic Factor modeling . . . . .	76
3.3	Results . . . . .	77
3.3.1	Allochthonous <i>DOC</i> and hypolimnetic $O_2$ . . . . .	77
3.3.2	AF modeling . . . . .	80
3.4	Discussion . . . . .	83
<b>II</b>	<b>WATERSHED SCALE MODELING</b>	<b>87</b>
<b>4</b>	<b>Using spatially distributed parameters and multi-response objective functions to solve parameterization of complex applications of semidistributed hydrological models</b>	<b>89</b>
4.1	Introduction . . . . .	89
4.2	The study site and the model . . . . .	90
4.3	Calibration strategy . . . . .	94
4.3.1	Objective function . . . . .	94
4.3.2	Regularization . . . . .	96
4.4	Numerical analyses . . . . .	96
4.5	Results . . . . .	97
4.5.1	Spatial distribution of adjustable parameters . . . . .	97
4.5.2	Relevance of data types on the calibration process . . . . .	99
4.5.3	Relevance of data types on the uncertainty of baseflow calculations . . . . .	101
4.6	Discussion and conclusions . . . . .	102

<b>5</b>	<b>Modeling river water temperature in semidistributed water quality applications using deterministic, empirical, and hybrid formulations</b>	<b>107</b>
5.1	Introduction . . . . .	107
5.2	Study site . . . . .	108
5.3	Modeling framework and advective heat inputs . . . . .	109
5.4	Non-advective heat exchanges . . . . .	111
5.5	Calibration strategy . . . . .	113
5.6	Results . . . . .	114
	5.6.1 Models performance . . . . .	114
	5.6.2 Heat exchanges . . . . .	117
5.7	Discussion . . . . .	119
<b>6</b>	<b>Scaling nutrient in-stream processes from the reach to the watershed using nutrient spiralling metrics</b>	<b>123</b>
6.1	Introduction . . . . .	123
6.2	Materials and Methods . . . . .	125
	6.2.1 Study Site . . . . .	125
	6.2.2 Modeling framework . . . . .	125
	6.2.3 Point sources and diffuse inputs . . . . .	126
	6.2.4 In-stream model definition . . . . .	127
	6.2.5 Calibration strategy . . . . .	129
6.3	Results . . . . .	129
6.4	Discussion . . . . .	131
	<b>General conclusions</b>	<b>137</b>
<b>III</b>	<b>APPENDIXES</b>	<b>141</b>
<b>A</b>	<b>Neuro-fuzzy load estimation: MATLAB codes, usage, and examples</b>	<b>143</b>
A.1	User Manual . . . . .	143
	A.1.1 Introduction . . . . .	143
	A.1.2 MATLAB files management . . . . .	144
	A.1.3 Data preparation . . . . .	144
	Main data file . . . . .	144
	Continuous input file . . . . .	144
	A.1.4 Structure identification . . . . .	145
	A.1.5 Parameter estimation . . . . .	146
	Generating Training and Checking files . . . . .	146
	Calculating loads . . . . .	146
	A.1.6 Results files . . . . .	147
	A.1.7 Performance analysis . . . . .	149
	A.1.8 Special error message . . . . .	150
A.2	MATLAB codes and example files . . . . .	152
	A.2.1 Anfispaper.m . . . . .	152

**xii** CONTENTS

A.2.2	Performance.m . . . . .	158
A.2.3	Resampler.m . . . . .	161
A.2.4	acorf.m . . . . .	163
A.2.5	acovf.m . . . . .	164
A.2.6	kendallrank.m . . . . .	165
A.2.7	kolmogorov.m . . . . .	167
A.2.8	normcdf.m . . . . .	169
A.2.9	stdncdf.m . . . . .	170
A.2.10	regressr.m . . . . .	171
A.2.11	runsrfr.m . . . . .	172
A.2.12	Data.dat . . . . .	173
A.2.13	Coninput.dat . . . . .	174
<b>B</b>	<b>Cohn's equation with a cubic fit to time</b>	<b>177</b>
<b>C</b>	<b>Fuzzy Regression as an exploratory data analysis</b>	<b>181</b>
	<b>References</b>	<b>185</b>

---

# List of Figures

---

1	Principals àrees urbanes i cursos fluvials a la conca del Ter . . . . .	7
1	Main urban areas and rivers in the Ter watershed . . . . .	29
1.1	(A) Location of the Ter River watershed and Sau Reservoir. (B) Location of the Mississippi River watershed and of sampling points. . . . .	39
1.2	Observed time-series of river nutrient concentration and flow in (A) the Ter River, and (B) the Mississippi River. . . . .	41
1.3	Steps during fuzzy reasoning. . . . .	44
1.4	Flow-normalized annual nutrient loads and standard deviation calculated through ANFIS, FLUX, and Cohn’s procedures. (A) Results for Ter River and (B) for Mississippi River. . . . .	47
1.5	Graphical representation of the if-and-then fuzzy rule structure obtained during nutrient load calculations in (A) the Ter River, and (B) the Mississippi River. . . . .	50
2.1	Schematic diagram showing the relative importance of vertical and horizontal processes on hypolimnetic nutrient cycling and oxygen content in (A) natural lakes and (B) canyon-shaped reservoirs. . . . .	56
2.2	Location (A) and bathymetric map (B) of Sau Reservoir. . . . .	57
2.3	Schematic representation of the circulation of the Ter River water in the lacustrine section of the Sau Reservoir. . . . .	59
2.4	(A) Annual water inflow to Sau Reservoir from the Ter River, and box-whisker plots for the calculation of the flow-normalized <i>TN</i> (B), <i>TP</i> (C), and <i>DOC</i> (C) load to the reservoir . . . . .	61
2.5	Box-whisker plots for the calculation of the flow-normalized ammonia (A) and nitrate (B) load to the reservoir. (C) Box-whisker plots for the ammonia:nitrate molar ratio in river load during the studied period . . . . .	61
2.6	(A) Evolution of the volume-normalized <i>PT</i> and <i>Chl-a</i> concentration in the summer epilimnion of Sau Reservoir, and (B) evolution of the volume-normalized oxygen concentration in the summer hypolimnion of Sau Reservoir . . . . .	62
2.7	Volume-normalized oxygen concentration observed in the hypolimnion of Sau Reservoir in summer against <i>DOC</i> concentration in the river inflow during summer. . . . .	63

2.8	The relationship between (A) $DOC_{inflow}$ and the volume-normalized SAS, (B) SAS and $TP_{hypo}$ , (C) $NO_3^-_{inflow}$ and the volume-normalized $NO_3^-_{hypo}$ , and (D) $NO_3^-_{hypo}$ and $TP_{hypo}$ .	64
3.1	C : N ratio in organic matter against chloride concentration in the river tributaries of the four reservoirs included in this study	73
3.2	Annual flow and box-whisker plots for measured TP, TN, and DOC concentration in the Ter River (Sau Reservoir tributary, left), and in the Foix River (Foix Reservoir tributary, right)	78
3.3	Time trace of epilimnetic TP and Chl-a concentrations (top), and hypolimnetic oxygen content (bottom) in Sau Reservoir (left), and Foix Reservoir (right)	79
3.4	Thermocline and river insertion depth for an average year in Sau Reservoir (left) and Foix Reservoir (right)	81
3.5	DOC load from the Ter River against estimated oxygen consumption in Sau Reservoir hypolimnion in monthly or bimonthly periods.	81
3.6	AF predictions (regression line and 95% confidence intervals) in (A, B) Foix Reservoir, (C, D) Sau Reservoir, (E, F) Brownlee Reservoir, and (G) Pueblo Reservoir	84
4.1	Ter watershed location and subbasins delineated for HSPF simulation, lithological zones, and land uses	93
4.2	(A) WEEK and (B) BASE observed values and prediction during the validation period. (C) HOUR observed values and prediction during the calibration period	95
4.3	(A) TRIM and (B) DURC observed values and prediction during the validation period	99
4.4	Box-whisker plots of the normalized range of the 25 sensitive parameters after completion of five calibration runs	101
4.5	Modelled mean baseflow and associated uncertainty during the validation period after completion of five calibration runs	102
5.1	Ter watershed map showing stream network (dark line), temperature sampling point, and meteorological stations used in this study	109
5.2	Scale-reduction factor evolution for all parameters involved in the models tested during calibration with the SCEM-UA algorithm	114
5.3	Marginal posterior distribution for all parameters involved in the models tested during calibration with the SCEM-UA algorithm	115
5.4	Observed average and minimum daily water temperature values and prediction range for model DET+	117
5.5	Detrended modeled values against detrended observed values using results from TEQ and DET+ models	117
5.6	Monthly box-whisker plot for observed daily river temperature range, and results obtained with DET+ and TEQ models	118
5.7	Insertion depth of Ter River in Sau Reservoir	119
5.8	(A) temperature of advective inputs from groundwater, interflow, and surface runoff. (B) Air temperature measured near the sampling point, range of equilibrium temperature modeled, and observed water temperature. (C) Net non-advective heat balance calculated with the TEQ model	119
5.9	Non-advective heat exchange components modeled with (A) DET model, and (B) DET+ model	120

5.10	Net non-advective heat exchange for models DET and DET+. A combination of several heat exchange components for model DET+ are also shown for reference . . . . .	121
6.1	(A) River <i>TP</i> sampling points and <i>TP</i> point sources in the Ter River watershed. (B) Main watercourses and land uses in the catchment . . . . .	126
6.2	A) Observed and modeled discharge at Roda de Ter for <i>TP</i> sampling dates. (B) Observed and modeled mean daily river temperature at Roda de Ter for <i>TP</i> sampling dates . . . . .	127
6.3	Power relationship between <i>TP</i> concentration and discharge at Roda de Ter . . . . .	129
6.4	Observed $TP_c$ values and model outcomes at Roda de Ter . . . . .	130
6.5	Observed versus modeled $TP_c$ values at Roda de Ter . . . . .	131
6.6	Median <i>TP</i> values observed in the different ACA sampling stations against modeled values .	131
6.7	Discharge versus $S_w$ for pristine and nutrient enriched streams . . . . .	133
C.1	SETAR results compared to Hudson's Bay data . . . . .	181
C.2	SETAR and Fuzzy Regression results compared to Hudson's Bay data . . . . .	182
C.3	Non-parametric regressions relating RTURB, RLOUD, and leaf Carbon gain . . . . .	183





---

# List of Tables

---

1.1	FLUX methods implemented during simulation of each period considered in the series of Rivers Ter and Mississippi. . . . .	43
1.2	Performance of the tested methods predicting daily river nutrient concentrations in the Ter and Mississippi rivers . . . . .	46
1.3	Performance of ANFIS estimation in Ter and Mississippi River scenarios. . . . .	49
2.1	Sau Reservoir main morphometric and hydrological data. . . . .	58
2.2	Analytical methods used to characterize Ter River and Sau Reservoir water samples. . . . .	60
2.3	Results of correlations between volume-normalized oxygen concentrations observed in the hypolimnion of Sau Reservoir during summer against a set of selected key variables measured in the epilimnion of the reservoir and the Ter River (also during the summer period). . . . .	62
3.1	Selected limnological features of the four reservoirs and tributaries included in this study. For some magnitudes standard deviation are given in brackets. . . . .	72
3.2	Spearman's $\tau$ correlation of volume-normalized mean summer oxygen concentration in the hypolimnion of Sau and Foix reservoirs against selected independent variables (see text for details). <i>P Value'</i> stands for the Bonferroni corrected <i>P Value</i> . Significance levels below 0.05 are highlighted for clarity. . . . .	80
3.3	Spearman's $\tau$ correlation between independent variables involved in significant correlations in Table 3.2, and the summer inflow. The upper side of both correlation matrices contains the sample size in brackets. . . . .	80
3.4	AF modeling results for the four reservoirs considered. All significance levels in this table were calculated with permutation test. Significance levels below 0.05 are highlighted for clarity. Equation 14 was included to avoid confusions. . . . .	82
4.1	Parameters of the Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) model. . . . .	92
4.2	Response-specific Nash-Sutcliffe Coefficients for the different calibration runs. . . . .	98
4.3	Parameter sensitivity and uncertainty for the run 6f. . . . .	100

**xviii** LIST OF TABLES

5.1	Parameters and prior ranges used in the definition of the three different model formulations for river temperature. Equation numbers refer to equations in the text. . . . .	112
5.2	Performance of tested models fitting average ( <i>ADT</i> ) and minimum ( <i>MDT</i> ) daily river water temperature during calibration and validation periods. The Akaike's information criterion and Akaike's weights calculated pooling both periods are also shown. . . . .	116
6.1	Prior ranges and final adjusted values during calibration of parameters used in the definition of the <i>TP</i> model. Equation numbers refer to equations in the text. . . . .	127
6.2	$S_w$ and discharge for different nutrient retention experiments in pristine and impaired streams	132





---

# Resum

---

## Introducció general

*El embalse es un híbrido de río y lago, y su estudio se ha de basar en una visión completa de la limnología.*

*Por otra parte, los embalses son ecosistemas muy conectados con los ecosistemas terrestres periféricos y apenas se gana nada en modelarlos independientemente.*

Ramón Margalef, 1983

Aquestes frases estan extretes del capítol dedicat als embassaments en la *Limnología* de Margalef (1983), y resumeixen dos temes cabdals en la limnologia dels embassaments. La influència del riu en la dinàmica dels embassaments ha sigut reconeguda fa temps (Imberger 1979), y ha motivat l'interès dels limnòlegs pels gradients associats a l'advecció. Això va arribar al seu màxim amb els treballs de Kimmel (1990), que definí tres zones teòriques als embassaments (i.e. advection, de transició i lacustre) depenent de la interacció entre l'entrada del riu y algunes regularitats en aspectes geomorfològics dels embassaments. El mèrit de la caracterització de Kimmel fou aplegar en un marc comú moltes observacions sobre aspectes diversos, incloent hidrologia, ambient lumínic, gradients longitudinals químics, balanços metabòlics i aspectes de qualitat de l'aigua. Encara que no totalment equiva-

lent, aquesta caracterització pot comparar-se amb el *River Continuum Concept* (Vannote et al. 1980), en el sentit que va dotar als limnòlegs d'embassaments un marc conceptual útil i convenient on acomodar observacions i noves hipòtesis. Com qualsevol gran generalització, la zonació de Kimmel té els seus inconvenients (per exemple, només embassaments amb formes allongades i amb una sola entrada de riu important son susceptibles d'acomplir el model), però va motivar gran part de la recerca posterior respecte la heterogeneïtat biològica en embassaments, junt amb els avenços teòrics durant els anys noranta (Straškraba et al. 1993).

La segona idea de Margalef expressada a l'inici d'aquesta introducció remarca el fet que la mateixa entrada del riu que genera la heterogeneïtat longitudinal en embassaments també defineix un vincle molt fort entre l'embassament i la seva conca (per exemple, Matias and Boavida 2005). Normalment, aquest vincle ha sigut conceptualitzat en forma de models empírics de càrrega-resposta (Uhlmann 1980; Kennedy 1999), o aproximacions de balanç de massa (Tomaszek and Koszelnik 2003). Curiosament, els investigadors de corrents empíriques consideren els embassaments com reactors homogenis en la majoria dels casos, ignorant la heterogeneïtat espacial present en pràcticament tot els processos.

Per tant, mentre que la heterogeneïtat horitzontal en embassaments s'ha considerat com un nou estàndard en limnologia (és a dir, acomodat en el marc teòric proposat per Kimmel), la relació entre els embassaments i la seva conca

ha sigut normalment considerada com una simple extensió de models desenvolupats per llacs (Istvánovics and Somlyódy 1999; Vidal and Om 1993). En la meua opinió, això provoca un biaix en la manera que els limnòlegs s'aproximen a l'estudi dels embassaments. Per alguna raó, la mística de la *heterogeneïtat* concentra l'atenció dels científics, y característiques fonamentals com el temps de residència o l'entrada de materials pel riu (Straškraba 1999a) són considerades només com generadores d'heterogeneïtat (per exemple, Mäsín et al. 2003). D'aquesta manera, i malgrat els avisos de Margalef (1983), Uhlmann (1998), Straškraba (1999b), Straškraba and Tundisi (1999), Tundisi et al. (1999), and Kennedy (2005), els investigadors tenen tendència a considerar els llacs com a models pels embassaments. De totes maneres, això és un error, ja que la comparació amb un riu és igualment pertinent i adequada. Un embassament és un riu que ha patit canvis profunds en les seves característiques geomorfològiques, i considerant els fluxos de material i energia no està clar si un embassament s'assembla més a un riu o a un llac. És un embassament un sistema subsidiari com un riu, o els fluxos d'energia estan dominats per la producció de matèria orgànica al·lòctona? Aquesta mena de preguntes no han rebut ni de bon tros l'atenció que han merescut els processos relacionats amb l'heterogeneïtat espacial, i segons ens consta romanen bàsicament sense contestar. Efectivament, estem d'acord amb el punt de vista de Kennedy et al. (2003) i Kennedy (2005), que sostenen que la mancança més significativa en la recerca sobre la limnologia dels embassaments és un coneixement a escala de conca o de sistema del rol dels embassaments en els paisatges hidrològics. Llavors, estem d'acord que els embassaments són sistemes híbrids, però no només en el sentit maniqueu que són rius transformant-se en llacs, generant per tant heterogeneïtat espacial. Els embassaments són sistemes híbrids en un sentit molt més profund, reflectit probablement també en el seu funcionament com ecosistema. Per tant, les dos idees de Margalef expressades al principi del capítol expressen de fet la mateixa idea. Els embassaments són rius modificats, per tant cal no oblidar-se del què és important

pels rius: la seva conca.

La discussió anterior pot semblar una consideració purament estètica, però té importants implicacions pràctiques. Per exemple, molts programes de seguiment de la qualitat de l'aigua que es desenvolupen actualment en embassaments es concentren en els processos a nivell de l'aigua embassada, sense cap atenció per les entrades de materials des del riu. Aquesta forma de plantejar l'estudi d'un embassament arrela en la impressió errònia de que els gestors seran capaços d'explicar els fets observats amb les eines que es fan servir per resoldre problemes similars plantejats en llacs. Fins i tot, sempre hi ha diners a l'abast per estudiar la volguda (i important) heterogeneïtat, però no hi ha mai pressupost per mostrejar l'entrada del riu. Des d'un punt de vista de la gestió d'un embassament, un programa de qualitat de l'aigua que no inclogui un punt de mostreig als principals tributaris de l'embassament es pot comparar a l'estudi d'un llac que no considera l'hipolímnió: podràs tenir certa informació, però oblidat de la visió global!

## Els embassaments a escala planetària

Malgrat que molts embassaments no tenen la bellesa inalterada de molts llacs, els limnòlegs han estudiat intensivament els embassaments per diverses raons. A part de ser sistemes molt dinàmics, ideals per estudiar acoblaments entre processos físics i biològics, molts països àrids i semiàrids no compten gaire llacs, però sí que disposen de molts embassaments. Els embassaments s'han convertit en la principal font d'abastament d'aigua en moltes regions, y són susceptibles d'albergar una quantitat enorme d'activitats de lleure. Per tant, els problemes de qualitat de l'aigua en embassaments són de considerable rellevància.

Avui dia, tenim més de 45 000 grans embassaments al món (Icold 1998). Encara que la taxa de construcció de nous embassaments ha caigut durant els darrers anys en els països desenvolupats (Gleick 2003), és pràcticament inevitable un ressorgiment en la construcció de preses donades les futures dependències d'abastament d'aigua i el creixement econòmic de països en desenvolupament.

(World Commission on Dams 2000). Com fan notar Kennedy et al. (2003) acuradament, les regions en desenvolupament són les que acumulen major potencial pel creixement de l'energia hidroelèctrica, mentre que el nostre coneixement de la limnologia i l'ecologia dels embassaments es basa en dades recollides en sistemes temperats de l'hemisferi Nord (essent la majoria llacs naturals!). Això posarà als limnòlegs en una situació molt compromesa, perquè la correcta gestió dels nous recursos dependrà d'una predicció correcta dels processos limnològics. Per tant, és certament urgent un marc teòric per la limnologia dels embassaments a nivell d'ecosistema, arrelat en observacions fetes en embassaments, y d'estudis no tant mediatitzats per la forma de treballar en llacs.

Un altre punt rellevant parlant del rol dels embassaments a escala global és el seu paper en l'emissió de gasos d'efecte hivernacle. Pot ser una mica tard, però el Panel Intergovernamental pel Canvi Climàtic va reconèixer en les seves línies guia del 2006 els embassaments com a emissors per elaborar inventaris de gasos, i les emissions dels embassaments també van ser reconegudes com un problema al principi del 2006 pel la taula de govern del Mecanisme de Desenvolupament Net, el principal sistema de comerç d'emissions de carboni del Protocol de Kioto (International Rivers Network 2006). Una de les raons per aquest endarreriment fou la discussió políticament interferida sobre la fiabilitat de les estimes d'emissió de gasos dels embassaments tropicals, disputa que va poder ser seguida en les pàgines de *Climatic Change* (veure Fearnside [2006]). Encara que emissions des d'embassaments s'han mesurat principalment en sistemes boreals i tropicals, on grans quantitats de metà són alliberades a l'atmosfera (Fearnside 1995; Giles 2006), molts embassaments temperats també semblen ser emissors nets (Soumis 2004). Aquest darrer descobriment suggereix que no només embassaments que inunden grans àrees de vegetació terrestres poden ser fonts d'emissió de gasos d'efecte hivernacle. Això posa sobre la taula la pregunta de quins són els embassaments temperats que son susceptibles de ser emissors nets de gasos a l'atmosfera, una pregunta que ha de ser contestada amb mesures d'intercanvi

de gasos fetes in situ, però també amb estudis del balanç metabòlic en aquests sistemes. Encara que aquesta Tesi no inclou cap data sobre emissions de gasos d'efecte hivernacle, si que conté capítols sobre el consum d'oxigen a l'hipolímnion dels embassaments, una qüestió que està directament relacionada amb el balanç metabòlic de l'ecosistema, i la producció de  $CO_2$ .

## Els models dinàmics en el context de la limnologia dels embassaments

Diversos factors han motivat que la limnologia d'embassaments sigui un dels camps de l'ecologia on els models dinàmics s'han aplicat extensivament. Freqüentment, decisions sobre enginyeria o gestió en embassaments depenen de paràmetres de qualitat de l'aigua (Kennedy 1999b). Per tant, l'ús de sistemes d'adquisició contínua de dades és freqüent en embassaments. Gestors i enginyers normalment demanen resultats que transcendeixen l'estudi del cas, ja que necessiten informació que cobreixi un ampli espectre de situacions, i que sigui útil per prendre decisions a curt termini. Això, sumat a la inherent complexitat associada als processos ecològics en embassaments, acaba amb problemes que excedeixen la capacitat de les aproximacions empíriques pures. Així que han sigut diversos els intents de desenvolupar models per simular processos hidrobiogeoquímics en embassaments en escales espacials i temporals curtes. Deixant de banda models desenvolupats per aplicacions molt concretes, les aplicacions més esteses son la família CE-QUAL (Cole and Buchak 1995), DYRESM (Imberger and Patterson 1981), CAEDYM (Romero et al. 2004), i WASP (Wool et al. 2003).

Però no només els processos dintre dels embassaments han centrat l'atenció dels investigadors. Donat que els embassaments son sistemes molt oberts i molt influenciats pels materials procedents de la conca de drenatge, han sigut nombrosos els intents d'ajustar models de conca amb models d'embassaments per explorar l'origen dels materials que entren a l'embassament, i per testar com escenaris alternatius a la conca poden afectar la limnologia de l'embassament. Encara que el modelatge de

conques és un tema interessant per ell mateix, les investigacions sobre la interacció conca-embassament han jugat un paper fonamental en el desenvolupament de models a escala de conca. Pot ser el millor exemple és el treball realitzat a l'Environmental Laboratory de l'US Army Corps of Engineers (USACE) a Vicksburg (USA), on el model CE-QUAL va ser dissenyat, i el model HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) parcialment desenvolupat, amb els embassaments de l'USACE com a protagonistes de la major part de les aplicacions. En aquest sentit, es pot dir que els investigadors involucrats en models han entès millor el rol de la conca en la limnologia dels embassaments que els investigadors centrats en recerca empírica. Hi ha un nombre immens d'aproximacions a la modelització de conques, encara que per aplicacions de qualitat de l'aigua els models més usats són els semidistribuïts. HSPF (Bicknell et al. 2001), SWAT (Srinivasan et al. 1993), INCA (Whitehead et al. 1998) i AGNPS (Young et al. 1995) són els models favorits si s'han de reproduir processos biogeoquímics.

Finalment, el canvi climàtic és un bon marc per desenvolupar models dinàmics per explorar tant les implicacions per la dinàmica de nutrients i d'altres components a escala de conca, com les implicacions directes del canvi climàtic en els embassaments. De totes maneres, és important fer notar que existeixen aproximacions empíriques prou eficients per simular ambdues coses, les importacions de materials des de la conca i l'exploració d'escenaris climàtics alternatius (Alexander et al. 2002b). Però aquestes aproximacions només són útils si n'hi ha prou amb resultats a escales anuals o més grans.

A part de l'estructura del model, les hipòtesis en les que es basa, la facilitat d'ús, i d'altres consideracions, el que és rellevant per un investigador és que *representa* un model. Un model numèric només és una formulació matemàtica afegida de apriorismes, inferències i dades (*hipòtesis auxiliars* en les paraules de Hempel and Oppenheim [1948]). Donat que els sistemes naturals són oberts (en el sentit aplicat al raonament lògic), cap marc conceptual expressat com un model matemàtic, malgrat la seva complexitat, pot demostrar la veritat de cap

proposició (Oreskes et al. 1994). A més a més, més d'una configuració d'un model pot ajustar amb les nostres dades (el problema del resultat no-únic). Per tant, un model que ajusta a unes dades no és un model *cert*, és només una definició matemàtica *probable* del procés que hi ha darrere.

Ja que un dels majors problemes dels models complexos és el del resultat no-únic, s'han proposat diverses metodologies per descriure el grau d'aquest problema per una aplicació donada, i per treballar-hi en contra. En el primer cas, els avenços de la estadística Bayesiana permeten als investigadors ajustar models d'una forma probabilística, obtenint una distribució de paràmetres i de respostes del model, en comptes d'un joc de paràmetres únics i una resposta també única. En el segon cas, la estratègia habitual (a part d'aconseguir el millor model disponible) és l'ús de diversos tipus de dades per ajustar el model, per evitar que l'algorisme de calibració disposi de massa flexibilitat per assignar valors als paràmetres. Aquesta Tesi mostrarà exemples d'aquests problemes i de les solucions aplicades en el context d'un model biogeoquímico a escala de conca.

De la discussió anterior en surt una conclusió: no podem validar un model. Aquesta és una desafortunada expressió habitual en treballs on es fan servir models complexos, perquè sembla implicar que si nosaltres validem un model (és a dir, la comparació de les sortides del model amb dades no fetes servir durant la calibració és positiva), el model és una representació veritable de la realitat. Però si una bona calibració no definia un model com *cert*, el mateix raonament es pot aplicar al concepte de validació. La validació ens informa sobre la confiança que ens poden merèixer uns resultats d'un model quan els comparem amb dades reals, però de cap manera ens confirma o testa la veracitat del model (Oreskes et al. 1994), ja que no hi ha una diferència real entre el procés de validació i el de calibració. Per tant, el principal valor dels models és com a eina heurística: els models són representacions, útils per esperar recerca, però no són susceptibles de provar res. De totes maneres, en moltes parts d'aquesta Tesi es fa servir el terme validació en el sentit que és susceptible d'ésser publicat en una revista amb revisió ex-

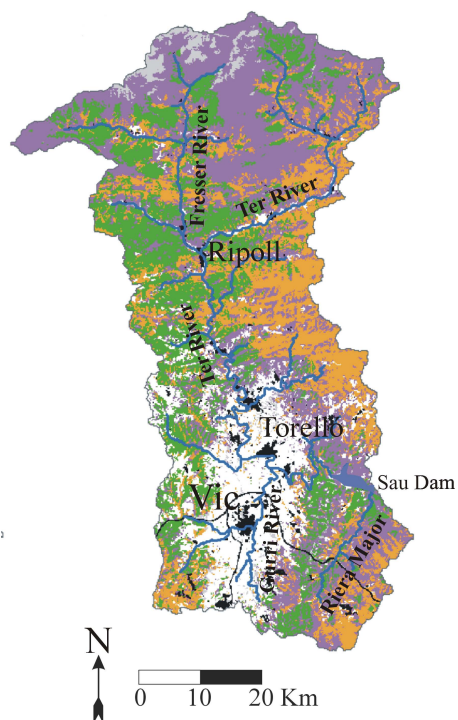


terna. És a dir, com un test independent del model.

## El sistema Embassament de Sau-Conca del Ter

La major part de les dades incloses en aquesta tesi corresponen a l'embassament de Sau (Espanya) i al seu principal tributari, el riu Ter. La conca del riu Ter (només l'àrea aigües amunt de l'embassament de Sau serà considerada en aquesta Tesi) té 1380 km<sup>2</sup>, i és una regió poblada (109 *persones km*<sup>-2</sup>), molt influenciada per l'activitat humana. El riu Ter neix a 2400 *m.s.n.m.* als Pirineus, recorrent 111 km fins arribar a la presa de Sau (Figura 1). El Riu Ter rep tres tributaris principals: el riu Fresser a la capçalera, el Riu Gurri a l'àrea agrícola i ramadera al voltant de Vic, i la Riera Major a la conca pròpia de l'embassament. Per una descripció detallada de la conca del Ter es pot consultar Sabater et al. (1995).

Les característiques de la conca varien al llarg de l'eix del riu. La capçalera flueix sobre roca silícica, a través de prats alpins, matollars de muntanya i boscos de coníferes. Encara que el clima a la conca és Mediterrani temperat, aquí el clima té influències alpines, amb precipitacions entre 1000 i 1500 mm. Diverses ciutats de menys de 4000 *habitants* mantenen una activitat industrial i ramadera moderada. Des de Ripoll (10 600 *habitants*) fins a Torelló (12 300 *habitants*) la major part del terreny és ocupat per boscos de coníferes de mitja muntanya i boscos de fulla caduca segons la orientació del vessant. Aquí l'activitat industrial va en augment, i el substrat és calcari, amb betes de guix. L'àrea compresa entre Torelló i el començament de l'embassament de Sau és una plana elevada a 500 *m.s.n.m.*, on cultius de secà i grans àrees urbanes (100 000 *habitants*) dominen el paisatge. La precipitació anual varia entre 700 i 800 mm. L'activitat industrial i ramadera és aquí molt important (ca 1 milió de porcs). La major part dels purins procedents de les granges d'engreix es fa servir com a fertilitzant en els cultius adjacents. Finalment, l'àrea al voltant de l'embassament és un terreny de mitja muntanya amb una cobertura vegetal mixta (vegetació caduca i perenne, coníferes, matollars), i amb



**Figure 1** – Principals àrees urbanes i cursos fluvials a la conca del Ter. Els colors representen diferents usos del sòl (Blanc: cultius; Verd: bosc de coníferes; Taronja: bosc caducifoli mixt; Violeta: matollars i prats alpins; Gris: terreny sense cobertura vegetal)

densitat humana baixa.

La hidrologia mostra un patró anual força irregular típic de les contrades mediterrànies, modulats per la influència dels Pirineus. El cicle anual té dos períodes de màxim cabal al maig i al novembre, governats per desgel i la pluja de tardor, respectivament (Armengol et al. 1991). La variabilitat interanual és molt conspícua, seguint la variabilitat en la precipitació. El cabal del riu Ter calculat usant dades a llarg termini és de 10 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

Les propietats químiques de l'aigua del riu Ter és el resultat d'un complex mosaic d'usos del sòl i activitats humanes (Sabater et al. 1990). Encara que les activitats humanes estan disseminades per tota la conca (especialment les minicentrals elèctriques), l'àrea al voltant de Vic acumula les aportacions de

fòsfor al riu. Els abocaments industrials i les depuradores d'aigües residuals són nombrosos en aquesta zona. Això s'ha d'afegir al fòsfor afegit als cultius amb l'aplicació de purins, que arriba a  $200 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ any}^{-1}$ . Els cursos d'aigua més afectats són els afluents de Ter al voltant de Vic (Riu Gurri, Riu Sorreig i Riu Ges). Malgrat que el riu Ter dilueix en part les aportacions d'aquest tributari, la concentració de fòsfor total a l'estació d'aforament a Roda de Ter sobrepassa freqüentment els  $0.20 \text{ mg L}^{-1}$ . Estudis de la qualitat de l'aigua i recerca en el context de l'ecologia al riu Ter són abundants (Sabater and Armengol 1986; Butturini and Sabater 1988; Sabater 1988; Sabater et al. 1989; Sabater et al. 1990; Sabater et al. 1991; Sabater and Sabater 1992; Sabater et al. 1992; Sabater et al. 1995; Espadaler et al. 1997; Guasch and Sabater 1998; Romaní and Sabater 2000; Sabater et al. 2000; Romaní and Sabater 2001; Butturini and Sabater 2002; Navarro et al. 2002; Fernandez-Turiel et al. 2003; Martí et al. 2004; Prat et al. 2004; Céspedes et al. 2006).

La presa de l'embassament de Sau fou construïda al 1963, 20 km aigües avall de Roda de Ter, definint un embassament amb una capacitat de  $165 \text{ hm}^3$  quan l'embassament és ple. Des de llavors, l'embassament de Sau ha generat una gran varietat d'activitats al seu voltant: generació d'electricitat, abastament d'aigua per agricultura i per usos humans i industrials, i activitats recreatives. Mentrestant, l'aigua de l'embassament ha patit un procés important d'eutrofització (Vidal and Om 1993), provocat per diverses activitats humanes a la conca: ús intensiu de fertilitzants, desenvolupament de la ramaderia intensiva i àrees industrials, i canvis en els usos del sòl (Sabater et al. 1990; Sabater et al. 1991; Vidal and Om 1993; Sabater et al. 1995; Espadaler et al. 1997). L'embassament passà d'un estat de moderada eutròfia durant els anys 70, a una eutrofització severa durant els darrers anys 80. La construcció de depuradores d'aigües residuals en les principals ciutats de la conca va provocar una lleugera millora de la qualitat de l'aigua de l'embassament (Vidal and Om 1993).

L'embassament de Sau ha resultat ser un excel·lent marc per estudis dins l'àmbit de l'ecologia,

incloent estudis sobre l'heterogeneïtat espacial de la producció primària i l'activitat bacteriana (Sommaruga et al. 1995; Šimek et al. 1998; Armengol et al. 1999; Šimek et al. 2000; Comerma et al. 2001; Šimek et al. 2001; Gasol et al. 2002; Comerma et al. 2003; Comerma et al. 2004; Nedoma et al. 2006), estudis empírics sobre processos d'eutrofització (Vidal 1969; Armengol and Vidal 1988; Vidal and Om 1993), evolució de les característiques dels materials sedimentats (Armengol et al. 1986), modelització de processos físics (Han et al. 2000; Vidal et al. 2005; Rueda et al. 2006), les conseqüències de la construcció de preses sobre els rius (Puig et al. 1987), comunitats de peixos (Carol et al. 2006), i acoblaments físics-biològics (Marcé et al. 2007). L'embassament també va ser inclòs en els dos estudis regionals sobre la limnologia dels embassaments espanyols (Margalef et al. 1976; Riera 1993).

## Objectius d'aquest estudi

L'antecedent bàsic d'aquest treball és el procés d'eutrofització de l'embassament de Sau. La companyia d'abastament d'aigua Aigües Ter Llobregat (ATLL) encetà l'estudi limnològic de l'embassament de Sau des de la seva posada en funcionament en 1963, acumulant dades que van servir per diversos estudis sobre l'estat tròfic de l'embassament. El més complert fou el treball de Vidal and Om (1993), que cobreix 20 anys de dades fins el començament de la dècada dels 90. En aquest treball van demostrar que el contingut de clorofil·la per unitat d'àrea a l'embassament (mesurat en mitjanes anuals) es relaciona proporcionalment amb la càrrega de fòsfor des del riu i el grau d'estratificació tèrmica durant els mesos d'estiu ( $p\text{-value} = 0.0004$ ,  $R^2=0.89$ ):

$$\begin{aligned} \text{Clorofil} \cdot \text{la-a} \text{ (mg m}^2\text{)} &= 27.8 \times L_{SRP} \\ &+ 35507.8 \times SMETS - 46.6 \end{aligned} \quad (1)$$

on  $L_{SRP}$  és la càrrega de fòsfor reactiu soluble normalitzada per la superfície de l'embassament ( $\text{g P m}^{-2}$ ), i  $SMETS$  l'estabilitat tèrmica màxima

a l'estiu ( $g\ m^3$ ). Aquest descobriment és només l'aplicació del model de Dillon (1975) desenvolupat per llacs.

Més tard, foren construïdes depuradores d'aigües residuals en els principals nuclis urbans i industrials de la conca durant els anys noranta, i s'esperava que això redundés en una disminució de les càrregues de nutrients a l'embassament i una millora en l'estat tròfic de l'embassament. Però, tot i que les càrregues de nutrients van disminuir, això només va redundar en una minsa millora en la qualitat de l'aigua, principalment canvis en la composició de la comunitat fitoplànctònica. A més a més, recerca a l'embassament ha emfatitzant el rol del bucle microbià a l'epilímnion de Sau (Comerma 2003), i el paper cabdal de la limitació de  $P$  i els enzims hidrolítics durant l'assimilació de nutrients per la producció primària (Nedoma et al. 2006). A més, la possibilitat de tenir càrregues internes des del sediment no ha sigut estudiada en detall. Tota aquesta informació suggereix que necessitem alguna cosa més que les càrregues de fòsfor per entendre el procés d'eutrofització de l'embassament.

**OBJECTIU GENERAL 1.** En aquesta Tesi volem explorar la dinàmica tròfica de l'embassament des d'un punt de vista original (és a dir, sense massa influència de la recerca feta en llacs). Donat que és obvi que la reducció de les càrregues de fòsfor no va assolir els resultats esperats en quant la millora de l'estat tròfic de l'embassament, hem explorat el paper d'altres compostos en el desenvolupament de l'anòxia en les capes fondes, ja que això és un tret comú d'aigües eutròfiques. Aquest objectiu definirà la primera part de la Tesi, desenvolupada en tres capítols.

*Capítol 1.* Donat que la càrrega externa és un factor clau en els models empírics d'eutrofització de llacs i embassaments, revisem aquí els mètodes més comuns de càlcul de càrregues de nutrients, i proposem un nou mètode especialment dissenyat pel càlcul de càrregues en conques que han patit una pressió humana fluctuant.

*Capítol 2.* En aquest capítol explorem els factors que controlen l'anòxia i la càrrega interna de fòsfor a l'embassament.

*Capítol 3.* Considerant els resultats del Capítol 2, proposem un nou paradigma pel desenvolupament de l'anòxia en embassaments, fent servir dades de Sau i d'altres sistemes de diferents parts del món.

Ja que l'embassament de Sau és un sistema involucrat en l'abastament d'aigua potable, i donat que nosaltres estàvem convençuts a priori de la importància de la conca en la limnologia de l'embassament a qualsevol escala espacial i temporal, el nostre segon objectiu va ser construir un model a escala de conca que inclogués la dinàmica de l'aigua i dels nutrients. Això permetrà en el futur estudis sobre l'efecte de pràctiques alternatives de gestió a la conca en l'estat tròfic de l'embassament, l'estudi i predicció dels efectes ecològics d'esdeveniments sobtats al riu a l'embassament, i l'estudi de les respostes de l'embassament al canvi climàtic. Evidentment, alguns d'aquests objectius demanen la construcció d'un model dinàmic de l'embassament connectat al model de conca, cosa que és fora de l'abast d'aquesta Tesi. Per tant, aquests són plans de recerca futurs, i no seran desenvolupats en el marc d'aquesta Tesi.

**OBJECTIU GENERAL 2.** Volem construir un model a escala de conca pel riu Ter aigües amunt de l'embassament de Sau, incloent hidrologia, temperatura de l'aigua del riu i la concentració de fòsfor total, com un primer pas per construir un model biogeoquímic complet. De totes maneres, volem anar més enllà del simple exercici de construir un model *ad hoc* explorant tant la capacitat de noves eines i estratègies de calibració de models, com la conveniència dels models com a plataformes heurístiques on comparar hipòtesis. Aquest objectiu definirà la segona part de la Tesi, desenvolupada també en tres capítols.

*Capítol 4.* Aquest capítol mostra la construcció del model hidrològic, testant la competència de mètodes de calibració amb múltiples objectius en escenaris de modelització complexos.

*Capítol 5.* Desenvolupament del model de temperatura de l'aigua. Aquesta secció fa servir la modelització com a plataforma per comparar hipòtesis alternatives, i explora la conveniència dels mètodes d'ajust de models basats en estadística Bayesiana.

*Capítol 6.* Finalment, definim el model per la concentració de fòsfor total al riu, comparant les formulacions del model amb informació procedent de recerca empírica.

## **Sobre l'adquisició de dades i estructura de la tesi**

La major part de les dades d'aquesta Tesi provenen del programa de seguiment limnològic i de la qualitat de l'aigua de l'embassament de Sau. La companyia Aigües Ter Llobregat (ATLL) ha finançat aquest programa des de que l'embassament va ser omplert el 1963. Des de 1994 el seguiment es fa en col·laboració amb l'equip de recerca liderat pel Dr. Joan Armengol al Departament d'Ecologia de la Universitat de Barcelona. Algunes dades incloses en aquesta Tesi van ser mostrejades en campanyes de camp que, òbviament, no poden ser atribuïdes a l'autor. L'autor ha recollit dades a l'embassament i el riu Ter des del 2001 fins al present. Informació prèvia prové principalment de l'esforç monumental d'Antoni Vidal (ATLL), que va conduir la caracterització limnològica de l'embassament des de 1963 fins el 1994, i també de treball de camp de Marta Comerma i Juan Carlos García. L'autor també és responsable de les dades recents recollides a l'embassament de Foix, encara que algunes dades prèvies al 1999 i de l'any 2002 varen ser recollides per Marta Comerma, Juan Carlos García, Joan Gomà i David Balayla.

Una quantitat considerable de dades incloses en aquesta tesi no van ser recollides per l'autor, sinó que van ser obtingudes de bases de dades computeritzades, accessibles en xarxa de man-

era gratuïta, o de dipòsits públics, principalment l'Agència Catalana de l'Aigua i el Servei Meteorològic de Catalunya. La secció de Materials i Mètodes del cada capítol dona els detalls sobre la metodologia pertinents per al capítol.

Volem avisar als lectors que aquesta Tesi està estructurada en capítols independents. Només les referències bibliogràfiques i els apèndixs han sigut col·locats en seccions comuns al final del document. Per tant, el lector pot veure's destorbat per algunes reiteracions en les introduccions o la descripció dels mètodes a cada capítol. Ens disculpem sincerament per aquest inconvenient. El Capítol 1 (inclosos els apèndixs A i B) és una versió lleugerament modificada d'un article publicat a *Limnology and Oceanography: Methods* (Marcé et al. 2004). La resta de capítols estan en revisió en diferents revistes amb avaluació externa.

## CAPÍTOL 1. Una eina de modelització neuro-difusa pel càlcul de càrregues de nutrients en conques amb impacte humà fluctuant

L'eutrofització de llacs i embassaments és un problema d'abast global (Walsh 1991; Alexander et al. 2000; McIsaac et al. 2001), i una de les principals causes és l'excés de nutrients que arriben des dels tributaris (Vollenweider 1968; Heaney et al. 1992; Reynolds 1992). Per tant, una avaluació acurada dels materials transportats pels rius és fonamental per a una gestió correcta dels recursos aquàtics.

Freqüentment les càrregues de nutrients es calculen per llargs períodes de temps, el que permet als gestors definir objectius realistes en quant a la disminució de nutrients, i també tenir una idea de la història de l'impacte humà en l'ecosistema. Aquestes càrregues es calculen amb dades hidrològiques que solen ser de qualitat i molt nombroses, però això no se sol complir en el cas de les concentracions de nutrients, dades que solen ser molt escasses. En aquestes situacions diverses aproximacions han sigut proposades, sent les *rating curves* i els *ratio estimators* (Cohn 1995) els mètodes més freqüentment emprats. De totes maneres, en situacions on la relació entre el cabal i la concentració de nutrients varia en el temps degut al canvi en la pressió humana en la conca, aquest mètodes tenen molts inconvenients, que poden ser resolts només parcialment amb estratègies de càlcul adequades.

En aquest capítol es proposa un nou mètode per calcular càrregues en aquesta situació, que es basa en la caracterització de la relació entre el cabal del riu i la concentració de nutrients mitjançant la lògica difusa.

### Material i mètodes

S'han calculat les càrregues anuals de fòsfor total a l'embassament de Sau des del riu Ter pel període 1973-2001, i les càrregues anuals de nitrat al riu

Mississipi (USA) durant el període 1955-1998, fent servir tres metodologies diferents: estimacions amb el software FLUX (*ratio estimators*), amb la *rating curve* proposada per Cohn et al. (1992), i amb el nou mètode proposat aquí.

### Resultats

Els resultats de les càrregues de nutrients han sigut similars en els tres casos, encara que el nou mètode ha evitat un dels problemes més importants associats a l'ús de les altres dues metodologies: l'aparició d'artefactes en les sèries de càrregues anuals en forma de salts interanuals no realistes. Això es degut a que amb les metodologies clàssiques el càlcul de càrregues s'ha de dividir en diferents porcions (i.e. grups d'anys), cosa que inclou discontinuïtats que es posen en evidència quan es dibuixa la sèrie de càrregues sencera. Com el nou mètode és capaç de calcular correctament les càrregues sense necessitat de dividir la sèrie en grups d'anys, l'esmentat artefacte no apareix a les sèries finals.

D'altra banda, la caracterització de la relació entre el cabal i la concentració de nutrients amb el nou mètode és molt satisfactòria, el que permet la reconstrucció de les concentracions al llarg del temps amb una precisió que supera la dels altres mètodes d'una forma clara. Un anàlisi de recombinatòria també ha mostrat que les càrregues de nutrients calculades amb el nou mètode no mostren cap biaix significatiu.

### Discussió

El nou mètode de càlcul de càrregues ha mostrat un comportament estadístic molt satisfactori, i totes les comparacions amb els mètodes clàssics han sigut favorables al nostre mètode. Per tant, es pot considerar que la nova metodologia hauria de ser aplicada sempre que es sospiti que la relació entre el cabal i la concentració de nutrients hagi patit variacions al llarg del període d'estudi. El nou mètode pot ser aplicat a la sèrie sencera encara que la relació cabal versus concentració sigui molt no lineal, i encara que les variacions d'aquesta relació al llarg del temps siguin molt importants.

D'altra banda, un avantatge del nou mètode és que a l'aplicar un sol ajust a tota la sèrie, els paràmetres de la relació difusa entre el cabal i la concentració del nutrient poden ser interpretats des d'un punt de vista dinàmic. Això és una característica molt interessant, ja que no només poden servir per entendre com la variació en l'impacte humà sobre el sistema ha afectat la càrrega de nutrients, sinó que converteix el nou mètode en una potent eina d'anàlisi exploratòria.

Tot això fa de la lògica difusa una eina atractiva no només per calcular càrregues en rius, on ha demostrat funcionar de manera òptima, sinó també en qualsevol àmbit de l'ecologia on necessitem una regressió no lineal variable en el temps o en l'espai.

## **CAPÍTOL 2. El paper de les entrades des del riu en la química de l'hipolímnion d'un embassament productiu. Implicacions per a la gestió de l'anòxia i la càrrega interna de fòsfor**

Normalment la capa hipolimnètica que es forma al fons dels llacs ha sigut considerada una capa aïllada de la interacció directa amb l'atmosfera i amb les aportacions dels rius. Això és degut a que la importància del component advectioniu en els llacs sol ser petita, i l'estabilitat tèrmica sol ser prou efectiva per aïllar aquesta capa durant els mesos d'estiu (Margalef 1983). Als embassaments, però, la situació és diferent. En aquests sistemes el component advectioniu té un rol molt més destacat, que ajuda a definir un gradient molt clar en les característiques de l'aigua entre l'entrada de l'embassament i les aigües properes a la presa (Kimmel et al. 1990).

Però el component advectioniu en embassaments no només és important per les implicacions en quant a la heterogeneïtat del sistema. Donat que la inèrcia tèrmica d'un riu i d'un sistema lenfític pot ser prou diferent, la temperatura i la densitat de l'aigua del riu i de l'aigua que emmagatzema l'embassament pot mostrar diferències importants (Ford 1990). Això pot provocar la presència del riu com a corrents de densitat en capes fondes de l'embassament, establint així una connexió directa entre l'hipolímnion i els materials que arrossega el riu.

En aquest capítol s'investiga la interacció entre els materials que transporta el riu Ter i la concentració d'oxigen i nutrients a l'hipolímnion de l'embassament de Sau, com a factor clau en el procés d'eutrofització de l'embassament.

### **Material i mètodes**

S'ha estudiat la concentració de nutrients al riu Ter, i la concentració d'oxigen i nutrients a l'hipolímnion i l'epilímnion de l'embassament de Sau durant els estius del període 1995-2005. Adicionalment, s'han calculat les càrregues de nutrients des del riu Ter, amb la metodologia presentada al Capítol 1. Finalment, s'ha descrit el patró anual de circulació del riu Ter a l'embassament de Sau mitjançant informació sobre la densitat de l'aigua del riu i de la columna de l'aigua de l'embassament.

### **Resultats**

L'evolució mensual de la circulació de l'aigua del riu Ter a l'embassament de Sau ha mostrat que durant l'estiu el riu entra a l'embassament com un corrent de densitat, per arribar directament a l'hipolímnion durant la major part de l'estiu. Les càrregues de nutrients a l'embassament des del riu Ter van patir una reducció des de l'any 1999, quan les depuradores d'aigües residuals a la conca van ser millorades amb cicle biològic. Aquesta reducció va afectar de manera significativa les càrregues d'amoni i carboni orgànic dissolt, però no va afectar les càrregues de fòsfor total, i les càrregues de nitrat fins i tot van augmentar. Això es degut a que el fòsfor ja era retirat dels efluent de les estacions depuradores amb els tractament físico-químics, mentre que els nous tractament biològics afavoreixen la presència als efluent del nitrat en detriment de les formes més reduïdes de nitrogen, principalment amoni.

Pel que fa a la relació entre els materials que entren al riu i els que trobem a l'hipolímnion de l'embassament, trobem que existeix una forta relació inversa entre la concentració de carboni orgànic dissolt al riu i la concentració d'oxigen a l'hipolímnion, mentre que cap variable epilimnètica va mostrar correlació significativa amb l'oxigen hipolimnètic.

Per altra banda el carboni orgànic dissolt controla la superfície de sediment anòxic que tenim a l'embassament, i aquesta variable, juntament amb la concentració de nitrat a l'hipolímnion, controla la concentració de fòsfor total a l'hipolímnion. Final-

ment, la concentració de nitrat a l'hipolímnion està fortament correlacionada amb la concentració de nitrat al riu.

## Discussió

Els resultats d'aquest estudi demostren que els models clàssics de càrrega-resposta desenvolupats als llacs (en el que la càrrega de nutrients des del riu controla la biomassa fitoplanctònica, que a l'hora serà la responsable del consum d'oxigen hipolimnètic quan aquests materials sedimentin), no tenen perquè ser necessàriament vàlids en l'embassament de Sau (i per extensió a molts embassaments). A l'embassament de Sau la concentració d'oxigen hipolimnètic no depèn d'aquest mecanisme de sedimentació de materials epilimnètics, sinó que depèn directament dels materials que entren des del riu a l'hipolímnion, concretament del carboni orgànic dissolt. Això suposa una diferència fonamental respecte el funcionament dels llacs, i hauria d'ajudar a redefinir les estratègies de gestió de la qualitat de l'aigua dels embassaments quan l'anòxia hipolimnètica és un dels problemes a resoldre.

Per altra banda, la concentració de fòsfor total a l'hipolímnion depèn tant de la superfície de sediment anòxic com de la concentració de nitrat a l'hipolímnion. Donat que aquestes dues variables depenen al seu torn dels materials que entren des del riu, es pot afirmar que la càrrega interna de fòsfor a l'embassament també és controlada pels materials que entren des del tributari. El mecanisme proposat consisteix en un control del carboni orgànic dissolt sobre la superfície de sediment anòxic, que delimita l'àrea on es pot donar càrrega interna de fòsfor. Per altra banda, si tenim concentracions hipolimnètiques de nitrat elevades, això afavoreix els desnitrificadors, que inhibiran altres processos metabòlics que farien baixar els potencials redox fins a nivells que afavoririen la càrrega interna de fòsfor.

Per tant, tant l'anòxia com la càrrega interna de fòsfor poden estar controlades pels materials que entren des del riu, sense intervenció de processos relacionats amb l'epilímnion. Això suposa un

canvi important en la forma que fins ara s'abordaven aquest problemes.



### **CAPÍTOL 3. El paper del carboni orgànic dissolt al·lòcton en el contingut d'oxigen hipolimnètic en embassaments**

Els models empírics per la predicció del contingut d'oxigen en l'hipolimnion dels llacs s'ha basat tradicionalment en l'assumpció que els nutrients que provenen de fora del sistema afavoriran la producció de biomassa epilimnètica. Aquesta biomassa, al sedimentar, serà la principal responsable del consum d'oxigen en les capes fondes. Per tant, aquests models consideren sempre alguna variable mesurada a l'epilimnion per predir el contingut d'oxigen de l'hipolimnion (Reckhow and Chapra 1983; Nürnberg 1984; Nürnberg 1995; Livingston and Imboden 1996).

Però tal i com s'ha demostrat en el capítol anterior, la situació en embassaments pot ser ben diferent, per que en aquests sistemes les entrades del riu són molt més importants, i poden entrar com una corrent de densitat per arribar directament a l'hipolimnion.

En aquest capítol es vol demostrar que és necessària una revisió dels models empírics per la predicció del contingut d'oxigen a l'hipolimnion dels embassaments. Fins ara s'han aplicat els models desenvolupats en llacs, que inclouen uns supòsits que poden no ser realistes treballant amb embassaments. Per això es fan servir dades de l'embassament de Sau, però també d'altres sistemes.

#### **Materials i mètodes**

La revisió dels models empírics per la predicció del contingut d'oxigen s'ha fet aplicant diverses metodologies. Primer s'ha testat la veracitat de les assumpcions dels models empírics desenvolupats en llacs fent servir dades de l'embassament de Sau i de l'embassament de Foix. Això s'ha fet aplicant regressions empíriques entre diverses variables mesurades al riu i a l'epilimnion d'aquests embas-

saments i el seu contingut d'oxigen a l'hipolimnion. Després, s'ha estudiat en detall si la quantitat de carboni orgànic que entra per períodes mensuals a l'embassament des del riu guarda relació amb la quantitat d'oxigen consumit a l'hipolimnion. Finalment, hem modelat l'Anoxic Factor (Nürnberg 1995) en els dos embassaments esmentats i dos més situats als USA, incloent en les equacions variables relacionades amb els materials transportats pel riu.

#### **Resultats**

Els resultats de l'estudi amb els embassament de Sau i Foix han demostrat que la concentració d'oxigen hipolimnètica depèn del contingut de carboni orgànic dissolt en els rius respectius. Cap variable relacionada amb l'epilimnion ha mostrat una correlació significativa. Per altre banda, l'anàlisi del consum d'oxigen a l'hipolimnion i de la quantitat de carboni orgànic dissolt que entra pel riu ha demostrat que existeix una relació 1:1 en l'embassament de Sau. Això dona un clar suport a la hipòtesi que és el carboni orgànic al·lòcton i no els materials d'origen epilimnètic els que controlen la concentració d'oxigen a l'hipolimnion. Els resultats a l'embassament de Foix han sigut en la mateixa línia, encara que en aquest cas el nombre de casos és molt més petit, així que és difícil ser categòric al respecte.

Pel que fa a la modelització de l'Anoxic Factor, ha quedat palès que l'efecte del carboni orgànic dissolt en el contingut d'oxigen s'esvaeix a mesura que l'impacte humà sobre la conca de l'embassament va disminuint. D'aquesta manera, als embassaments de Sau i Foix els materials al·lòctons tenen molt pes en les equacions predictives, mentre que en embassaments amb baixa influència humana l'efecte d'aquests materials en el contingut d'oxigen no és significatiu, i gran part de la variabilitat s'explica amb variables hidrològiques.

#### **Discussió**

Els resultats d'aquest capítol demostren que els models empírics desenvolupats per llacs no tenen per que ser vàlids en embassaments, especialment

aquells que suporten una pressió antròpica considerable. Això hauria d'esperonar la recerca en embassaments per construir un cos teòric i empíric independent del que ja tenim pels llacs. Això és cert pel contingut d'oxigen a l'hipolímnion, però hauria de ser igualment vàlid per altres processos que depenen directament o indirecta de la concentració d'oxigen a l'hipolímnion. Per exemple, molts models empírics desenvolupats a llacs prediuen la resiliència de l'eutrofització en base a mecanismes de càrrega interna de fòsfor que en darrer terme estan controlats per la biomassa epilimnètica. És evident que en molts embassaments això no seria cert, i la càrrega interna estaria més relacionada amb els materials procedents del riu. Això podria explicar alguns dels fracassos en la recuperació de sistemes eutròfics després de programes de millora basats exclusivament en la reducció de la càrrega de nutrients, sense tenir en compte els materials orgànics que el riu també pot transportar.

L'efecte en els embassaments de la matèria orgànica al·lòctona dependrà del temps de residència, ja que en aquests sistemes el temps de residència sol ser molt curt (per sota d'un any). Això fa que només les fraccions més làbils del carboni orgànic tindran un efecte significatiu en el metabolisme del sistema. Per tant, embassaments que reben efluents procedents d'activitats humanes o ramaderes, rics en compostos orgànics fàcilment degradables, i amb temps de residència moderats o alts haurien de ser molt sensibles a aquesta entrada de materials des del riu.

Finalment, sembla urgent un estudi de llarg abast sobre l'influència dels materials orgànics dissolts en llacs i embassaments. Malgrat que en principi això ja ha estat testat pel cas dels llacs (Nürnberg's 1995), una mirada crítica a aquest treball ens fa concloure que ni tant sols en aquest sistemes l'efecte dels materials orgànics dissolts sobre el metabolisme dels llacs està testat definitivament.

## **CAPÍTOL 4. L'ús de paràmetres distribuïts espacialment i funcions-objectiu multiresposta per a la calibració d'aplicacions complexes de models hidrològics semidistribuïts**

Els models semidistribuïts són la tria més usual quan s'ha de modelar la qualitat de l'aigua a escala de conca, ja que representen un bon compromís entre la qualitat i la resolució dels resultats i l'esforç necessari per obtenir-ho. Una aplicació hidrològica que hagi de servir per nodrir un model biogeoquímic no només ha de simular el cabal del riu de manera adequada, sinó que a més ha d'escalar els fluxos subsuperficials de forma òptima. Malauradament, molts cops la informació disponible no permet una correcta determinació d'aquests fluxos, i aquest important punt en la calibració del model hidrològic resta sense comprovar, amb els efectes negatius que això pot comportar pel model biogeoquímic.

Durant el darrers anys s'ha posat molt d'esforç per trobar sistemes automàtics i estratègies de calibració per intentar solucionar aquests problemes. Una de les maneres és treballar amb funcions objectiu que incloguin diverses característiques de les dades de camp (Madsen 2000). També s'ha treballat en la via de calibrar els models no cap a un sol punt, sinó cap al espai de Pareto sencer (Gupta et al. 1998; Vrugt et al. 2003). Finalment, diverses estratègies de regularització s'han desenvolupat per permetre treballar amb paràmetres distribuïts espacialment, sense que això impliqui un problema irresoluble numèricament.

En aquest capítol calibrarem un model hidrològic per a la conca del Ter fins a l'embassament de Sau, demostrant que es pot calibrar adequadament un model molt complex fins i tot amb dades de camp limitades. Per aconseguir-ho, combinarem una estratègia de regularització adequada amb una funció objectiu composta.

### **Materials i mètodes**

Hem fet servir el model Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) per simular la hidrologia en la conca del Ter. Informació meteorològica, d'usos del sòl, geològica i geomorfològica s'ha combinat per generar un seguit de subconques i unitats de resposta hidrològica, que són les unitats bàsiques de treball del model. El període considerat ha sigut des de 1999 fins a 2004.

El model s'ha calibrat assignant valors bibliogràfics a alguns paràmetres, i ajustant automàticament amb un algorisme de calibració per la resta. Per la calibració dels paràmetres ajustables, s'ha fet servir una funció objectiu que combina els cabals del riu diaris, horaris i trimestrals a Roda de Ter, a més d'incloure altres aspectes de les dades, com la distribució de freqüències i la contribució per flux basal estimada. A més, s'ha imposat un criteri de homogeneïtat en els paràmetres distribuïts espacialment, penalitzant l'heterogeneïtat durant el procés de calibració.

Adicionalment, hem estudiat l'efecte de la inclusió dels diferents tipus de dades en la funció objectiu en la capacitat del model per modelar la hidrologia de la conca, amb calibracions successives amb diferents tipus de dades incloses en el procés.

### **Resultats**

L'ajust del model a les dades de camp va ser molt satisfactori, fins i tot a escala horària. Diverses mesures de l'ajust del model a les diferents característiques de les dades incloses en la funció objectiu van donar resultats bons, i són totalment comparables als resultats obtinguts en d'altres treballs.

L'estratègia de calibració va permetre calibrar diversos paràmetres amb heterogeneïtat espacial, especialment aquells relacionats amb la litologia. Fins i tot alguns paràmetres van ser ajustats a valors variables al llarg del temps.

La inclusió de diferents respostes en la funció objectiu va provocar canvis evidents en la capacitat del model per simular adequadament la hidrologia de la conca. Remarcablement, l'efecte sobre la funció objectiu d'un tipus de dades depèn dels tipus

de dades que ja són presents en la funció objectiu, el que fa molt difícil decidir a priori quin tipus de dades és més convenient afegir a la funció objectiu. Finalment, la inclusió de diferents tipus de dades en la funció objectiu va tenir efectes molt positius en la incertesa de la separació de fluxos entre superficials i subsuperficials.

## **Discussió**

Els resultats d'aquest capítol exemplifiquen alguns dels problemes associats a l'ús de models matemàtics molt complexos, quan aquests no van acompanyat de dades de camp abundants. De totes maneres, un ús adequat de les dades disponibles pot ser determinant a l'hora de calibrar amb èxit un model complex. Això no només es refereix a la qualitat de l'ajust, sinó també a l'incertesa dels resultats i la possibilitat d'assignar a alguns paràmetres valors diferents segons les característiques de diferents regions de la conca.

## **CAPÍTOL 5. Simulant la temperatura de l'aigua en rius en models de qualitat de l'aigua semidistribuïts fent servir aproximacions determinístiques, empíriques i híbrides**

La temperatura de l'aigua en rius no només controla la velocitat dels processos bioquímics, sinó que també afecta de manera essencial la densitat de l'aigua, aspecte que pot ser molt important quan es vol determinar l'efecte d'un riu sobre un embassament aigües avall.

La simulació de la temperatura de l'aigua en models a escala de conca sol aconseguir-se amb formulacions que tenen en compte tots els processos físics normalment implicats en els intercanvis de calor entre l'aigua i l'atmosfera. De totes maneres, existeixen aproximacions empíriques que relacionen la temperatura del riu i la de l'aigua que simplifiquen la tasca de modelització, i que demanen una quantitat de dades més realista, tenint en compte la informació a l'abast en la majoria de casos en que s'estudia la temperatura del riu només com un pas per a l'estudi de la qualitat de l'aigua des del punt de vista químic o biològic.

En aquest capítol estudiem la capacitat de tres formulacions dels intercanvis de calor entre l'aigua i l'atmosfera (una empírica, una altra determinista i, finalment, una formulació híbrida amb aspectes de les dues anteriors) per simular la temperatura de l'aigua del riu Ter a Roda de Ter, i la fondària d'inserció del riu a l'embassament de Sau.

### **Material i mètodes**

Prenent de base dades de la temperatura de l'aigua horàries a Roda de Ter entre 2001 i 2004, s'han intentat simular les temperatures mitjanes i mínimes diàries, així com la fondària d'inserció del riu Ter a l'embassament de Sau. Les dades provenen d'una estació automàtica gestionada per l'Agència

Catalana de l'Aigua.

La temperatura de les entrades advectiones des de la conca s'ha modelat amb les formulacions accessibles al programa Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF), mentre que pels intercanvis de calor no-advectiones s'han implementat diverses formulacions modificant el codi de HSPF. Una formulació és la que es troba per defecte a HSPF, i es pot considerar una formulació determinista. Després s'ha programat una formulació basada en la temperatura d'equilibri, i finalment una formulació híbrida que inclou aspectes de totes dues formulacions.

Els models s'han calibrat amb l'algorisme SCEM-UA.

### **Resultats**

El model que ha donat els millors resultats tant en el període de calibració com en el de validació ha sigut el model híbrid, seguit pel model empíric. El model determinista ha resultat ser el menys eficient. L'adequació dels models no és dependent de la complexitat del model, tal i com un anàlisi amb el criteri de Akaike ha deixat palès.

De totes formes, els intercanvis de calor definits pel model híbrid han resultat ser no realistes en referència al que les formulacions matemàtiques en principi expressen. Els intercanvis de calor del model empíric tampoc semblen ser del tot satisfactoris.

### **Discussió**

El fet que el model híbrid hagi donat millors resultats que la resta d'alternatives suggereix que les dades meteorològiques que s'han fet servir per alimentar el model no són òptimes. Encara que aquesta informació prové de estacions meteorològiques d'alt estàndard, la seva ubicació no sempre les fa adients per mesurar les particulars condicions microclimàtiques que es produeixen a prop del riu. Per tant, s'ha d'anar amb molt de compte a l'hora de fer servir dades d'estacions meteorològiques pensades per recollir informació regional per alimentar models de temperatura en rius.

El model híbrid sembla constituït per un mòdul

d'intercanvi de calor regulat per la temperatura d'equilibri, que donaria un cicle anual clar. Això es veuria modulats per intercanvis de calor suposadament deterministes, però que en aquesta formulació tenen un sentit físic dubtós.

Per concloure, sembla que per aplicacions a escala de conca, on la informació meteorològica no sol provenir d'estacions meteorològiques situades a la vora dels rius, els models que funcionen millor són aquells que fan servir la temperatura de l'aire com a principal variable explicativa.

## **CAPÍTOL 6. Dimensionant la dinàmica de nutrients als rius des del tram fins a la conca fent servir mètriques de l'espiral de nutrients**

Els models biogeoquímics en rius solen incloure formulacions més o menys deterministes per simular el comportament de nutrients al canal. Això inclou equacions per un gran nombre de processos, des de l'assimilació per part dels productors fins a l'alliberament de nutrients durant la descomposició de la matèria orgànica, i fins i tot processos físics d'adsorció en fraccions minerals. Per tant, aquests models poden incloure fins a desenes de paràmetres involucrats en la dinàmica de nutrients.

Si aquestes formulacions formen part d'un model a escala de conca la situació és encara més complicada, ja que les característiques físiques i de les comunitats biològiques del riu poden variar dramàticament al llarg de l'eix del riu. En aquesta situació, el nombre de paràmetres present al model pot ser realment molt alt, i difícilment es podrà disposar de tota la informació necessària per poder parametritzar el model sense necessitat d'un procés de calibració molt complex, i sense garanties d'èxit.

En aquest capítol assagem la conveniència de fer servir la informació procedent de dades empíriques recollides seguint el concepte de l'espiral de nutrients per la parametrització de models a escala de conca, i que fan servir el tram de riu com a unitat topològica de treball.

### **Material i mètodes**

A partir de les formulacions per la simulació del cabal i de la temperatura al riu desenvolupades en els capítols anteriors, s'ha incorporat la dinàmica del fòsfor total a la conca. Per simplificar el problema, només s'han tingut en compte els períodes sense aportacions per escorrentia superficial. La dinàmica de nutrients s'ha simulat en HSPF modificant el codi del programa per formular un procés d'assimilació de fòsfor de primer ordre, fent

servir la velocitat d'assimilació com a paràmetre ajustable. Les aportacions de fòsfor subsuperficials s'han modelat suposant dinàmiques de dilució amb el cabal, i les aportacions puntuals s'han inclòs segons dades de l'Agència Catalana de l'Aigua.

Durant el procés de calibració, la sèrie observada de concentració de fòsfor a Roda de Ter ha sigut corregida per la diferència de cabals simulats i observats, considerant que el fòsfor total segueix una dinàmica de dilució amb el cabal. El model ha sigut calibrat amb un algorisme de remostreig. S'han deixat un seguit de dades fora de la calibració pel procés de validació, incloent dades de qualitat incerta extretes de les bases de dades públiques de l'Agència Catalana de l'Aigua, recollides en diferents punts de la conca.

### **Resultats**

L'ajust entre les dades observades i el model a Roda de Ter ha sigut satisfactori, encara que és evident cert biaix en moments de concentració baixa. La comparació amb les dades de l'Agència Catalana de l'Aigua a la conca també ha sigut positiva.

Per altre banda, el valor ajustat de velocitat d'assimilació de fòsfor total ha sigut molt realista, i comparable a valors trobats en sistemes afectats per aportacions humanes trobats a la conca del Ter i sistemes similars a Catalunya.

### **Discussió**

Els resultats d'aquest treball demostren que la informació empírica sobre els processos del riu obtinguda a escala de tram pot ser molt útil a l'hora de formular models a escala de conca, ja que es fa coincidir l'escala a la que es recullen les dades amb l'escala de funcionament del model, és a dir, el tram.

De fet, la velocitat d'assimilació obtinguda amb el model és ben comparable a les obtingudes arreu del món en sistemes influenciats per aportacions puntuals d'aigües residuals. Llavors, encara que és un argument circular i, per tant, no serveix com a prova, la coincidència entre el model i les dades empíriques recolzen la idea que els rius afectats per aportacions puntuals tenen una eficiència de

retenció de nutrients disminuïda. A l'hora, aquesta coincidència reforça la idea que la informació obtinguda a escala de tram es pot fer servir per la construcció de models a escala de conca. Això simplifica el procés de modelització, ja que passem de treballar amb una multitud de processos amb dinàmiques incertes, a un procés a escala de tram relativament fàcil de caracteritzar, i a més que sembla generalitzable.



## Conclusions generals

**CONCLUSIÓ GENERAL 1.** Algunes característiques del procés d'eutrofització de l'embassament de Sau (és a dir, el contingut d'oxigen a l'hipolímnion i la càrrega interna de fòsfor) estan íntimament lligades a la qualitat de l'aigua del riu Ter. Però tot i les hipòtesis de partida dels models empírics clàssics, no hi ha cap procés epilimnètic que hi jugui un paper determinant. Això no és un cas particular, sinó que es tracta d'una diferència fonamental entre els sistemes dominats per l'advecció i la majoria de llacs.

*Respecte la tècnica neuro-difusa de càlcul de càrregues.* El nou mètode de càlcul de càrregues és superior a les aproximacions clàssiques, i evita els inconvenients més importants associats a la seva aplicació. El nou mètode també ha mostrat propietats interessants que fan d'ell una possible eina d'anàlisi exploratòria per problemes no lineals.

*Respecte la química a l'hipolímnion de l'embassament de Sau.* L'oxigen i el contingut en fòsfor a l'hipolímnion depèn del carboni orgànic dissolt i del nitrat aportat pel riu Ter, sense cap intervenció significativa de processos epilimnètics.

*Respecte el contingut d'oxigen a l'hipolímnion dels embassaments.* El contingut d'oxigen a l'hipolímnion dels embassaments està molt influenciat per la càrrega de carboni orgànic dissolt al riu. Donat que el temps de residència en embassaments és curt, els efectes del material orgànic al·lòcton serà més conspicu en sistemes que rebin una forta càrrega de carboni orgànic dissolt làbil d'origen humà. Aquests resultats haurien de motivar la formulació d'un nou paradigma per a la modelització empírica del contingut d'oxigen i la resiliència a la eutròfia en embassaments.

**CONCLUSIÓ GENERAL 2.** L'estat de la ciència i la informació disponible per rius i conques de Catalunya fan possible l'aplicació de mod-

els hidrològics i biogeoquímics complexes a escala de conca. Els nous mètodes de calibració i de gestió de les dades permeten la implementació d'aquestes aplicacions fins i tot tenint en compte la escassetat de dades de camp.

*Respecte la simulació hidrològica.* Una combinació adequada d'una estructura de model i una calibració multiobjectiu és essencial per a la implementació d'un model hidrològic semidistribuit a escala de conca. Si la calibració es fa amb cura, fins i tot es pot assignar a alguns paràmetres heterogeneïtat espacial. De totes maneres, en un escenari de modelització complex pot ser difícil decidir a priori quines seran les dades de camp més útils durant el procés de calibració.

*Respecte la simulació de la temperatura del riu.* Quan les úniques dades disponibles com a entrades pel model són dades meteorològiques d'estacions situades lluny dels cursos fluvials, models empírics o híbrids que incloguin formulacions basades en la relació entre la temperatura de l'aire i de l'aigua haurien de ser prioritzades.

*Respecte la simulació del fòsfor total al riu.* La informació empírica a escala de tram recollida seguint el marc teòric del concepte de l'espiral de nutrients és una informació molt interessant per fer funcionar models a escala de conca. Encara que els exercicis de modelització d'aquesta Tesi no poden provar hipòtesis, els resultats recolzen la idea que rius amb fortes aportacions d'aigües residuals són menys eficients que els rius de capçalera a l'hora de retenir fòsfor.



# Chapter 0

---

## General introduction

---

*The reservoir is a hybrid between river and lake, and its study must be founded on a complete picture of limnology.*

*On the other hand, reservoirs are ecosystems strongly linked with the surrounding terrestrial ecosystems, and it is hardly useful to model them independently.*

Ramón Margalef, 1983

The above sentences come from the chapter devoted to reservoirs in Margalef's (1983) *Limnología*, and summarize two important topics in reservoir limnology. The long recognized influence of the river inflow on reservoir dynamics (Imberger 1979) fueled the interest of limnologists in the gradients associated to advection. This reached its maximum with the seminal work by Kimmel (1990), who defined three theoretical zones in reservoirs (i.e. riverine, transitional, and lacustrine) depending on the expected interaction between the river inflow and some commonalities in the geomorphologic traits of reservoirs. The merit of Kimmel's characterization was to gather in a common framework many observations concerning a vari-

ety of processes, including hydrology, light ambient, chemical longitudinal gradients, metabolic balances, and water quality issues. Although not totally equivalent, this characterization could be compared with the *River Continuum Concept* (Vannote et al. 1980), in the sense that it offered to reservoir limnologists a useful and convenient explanatory frame in which place observations and new hypotheses. Like any vast generalization, Kimmel's zonation has its drawbacks (e.g. only canyon-shaped, single inflow reservoirs are prone to follow expectations), but it motivated much of the subsequent research on biological heterogeneity in reservoirs, in conjunction with the theoretical developments during the 1990s (Straškraba et al. 1993).

The second Margalef's idea expressed in the head of this chapter emphasizes the fact that the same riverine input that fuels the longitudinal heterogeneity in reservoirs also defines a strong link between the reservoir and its watershed (e.g. Matias and Boavida 2005). This link has been conceptualized mostly in the form of load-response empirical models (Uhlmann 1980; Kennedy 1999), or mass-balance approaches (Tomaszek and Koszelnik 2003). Curiously, empirical modelers usually consider reservoirs as stirred reactors, ignoring the longitudinal spatial heterogeneity present in almost all processes.

Thus, whereas longitudinal heterogeneity in reservoirs has been considered as a new standard in limnology (i.e. accommodated in the Kimmel's theoretical framework), the relationship between reservoirs and their surroundings has usually been worked as an extension of models coming from lakes (Istvánovics and Somlyódy 1999; Vidal and Om 1993). In my opinion, this promotes a structural bias in the way limnologists approach reservoirs. For some reason, the mystic of *heterogeneity* focuses the attention of researchers, and key limnological features like residence time or the river inflow (Straškraba 1999a) are often invoked only as generators of heterogeneity (e.g. Mäsín et al. 2003). In this way, and despite the wise warnings by Margalef (1983), Uhlmann (1998), Straškraba (1999b), Straškraba and Tundisi (1999), Tundisi et al. (1999), and Kennedy (2005), researchers tend to take lakes as models for reservoirs. However, this is a misconception because the comparison with a river is equally justified and pertinent. A reservoir is a river undergoing very profound changes in its geomorphologic settings, and considering material and energy flows in the ecosystem it is not clear whether a reservoir is more resembling a river or a lake. Is it a reservoir a subsidized ecosystem like a river, or the energy flows are dominated by autochthonous production of organic matter? This kind of questions has not received nearly the attention that heterogeneity related issues, and to our knowledge they remain mostly unanswered. Effectively, we agree with the view of Kennedy et al. (2003) and Kennedy (2005), who pleaded that one of the most important research needs in reservoir limnology is a catchment or system-level understanding of the role of reservoirs on the dynamics of hydrologic landscapes. So yes, reservoirs are hybrid systems, but not only in the manichaeian sense that they are rivers transforming into lakes, and thus generating longitudinal heterogeneity. Reservoirs are hybrid systems in a much more profound sense, probably also reflected in its functioning as a whole ecosystem. Thus, Margalef's sentences above expresses in fact the same idea: a reservoir is a modified river, so do not forget which is important for rivers: the watershed.

The above discussion could seem just an aestheti-

cal dispute, but it has very important practical implications. For example, many water quality programs currently developing in reservoirs are focused on what is happening in the water column of the reservoir, without regard of what is happening in the inflow to the water body. This is grounded in the false impression that managers will be able to explain observations with the *lake tool kit*. Even, some money is often available to sample the reservoir in search of the loved (and important) heterogeneity, but funding is never there to sample the river inflow. From a management point of view, a reservoir water quality monitoring program lacking a sampling point in the river inflow (or inflows if applicable) could be compared to a lake survey missing the hypolimnion: you will have some information, but forget the complete picture!

## Reservoirs in the global

Although most reservoirs lack the untouched beauty of most lakes, limnologists have turned to reservoirs for several reasons. A part from being very dynamical systems very well suited to study physic-biological coupling, most arid and semiarid countries cannot count lakes, but reservoirs. Reservoirs have become a principal component of the water supply in many regions, and they have a great capacity to appeal a myriad of leisure activities. Thus, water quality issues in reservoirs are of considerable importance.

Nowadays, we have more than 45 000 large dams in the world (Icold 1998). Although the rate of construction of dams have declined during last years in developed countries (Gleick 2003), resurgence in dam construction is almost inevitable due to future dependencies on water supply and the economic and population growth in developing countries (World Commission on Dams 2000). As appropriately noted by Kennedy et al. (2003), developing regions keep the greatest potential for hydropower development, while our understanding of reservoir limnology and ecology is based on data collected on North temperate systems (and mostly natural lakes!). This lack of information will pose reservoir limnologists

in a very demanding situation, because proper management of the new resources will rely on a correct prediction of limnological processes. Thus, it is certainly urgent a theoretical framework for reservoir limnology at the system-level, grounded in observations collected at reservoirs, and from studies not so influenced by the lake-view of the problem.

Another relevant point concerning reservoirs at a global scale is their role on green house gas emissions. Maybe late, but the Intergovernmental Panel on Climate Change recognized in its 2006 guidelines on greenhouse gas inventories that reservoirs are a source of emissions, and reservoir emissions were also recognized as an issue of concern in early 2006 by the governing board of the Clean Development Mechanism, the Kyoto Protocol's main carbon trading system (International Rivers Network 2006). One of the reasons for this delay was a political interfered dispute about the reliability of data on green house gases emissions from tropical reservoirs, argument that could be followed in the pages of *Climatic Change* (see Fearnside [2006]). Although reservoir emissions have been measured mainly in boreal and tropical regions, where huge amounts of methane are released to the atmosphere (Fearnside 1995; Giles 2006), many temperate reservoirs appear to be net sources as well (Soumis 2004). This last finding suggests that not only reservoirs flooding vast areas of terrestrial vegetation may be net sources of green house gases. This poses the question of which kind of temperate reservoirs are prone to release green house gases to the atmosphere, a question that should be answered from in situ measurements of gases exchange, but also from regional information about the metabolic balance in these water bodies. Although this dissertation do not contain any data on green house gases emissions, it do contain chapters devoted to oxygen consumption in the hypolimnion of reservoirs, a matter that is directly related to the metabolic balance of the ecosystem and the production of  $CO_2$ .

## Dynamic models in the context of reservoir limnology

Several facts have motivated reservoir limnology being one of the fields of ecology where dynamical models have been extensively applied. Frequently, management and engineering decisions in reservoirs rely on water quality considerations (Kennedy 1999b). Thus, the use of continuous data acquisition systems is frequent in reservoirs. Managers and engineers usually demand answers beyond the study-case, because they need information covering a wide range of situations, and useful for decision-making in short time and spatial scales. This, summed to the inherent complexity associated with ecological processes in reservoirs, ends with problems that exceed the capacity of pure empirical approximations. Thus, several tools have been developed to simulate hydrobiogeochemical processes in reservoirs at short time and spatial scales. Apart from site-specific models, principal widespread applications are the CE-QUAL family (Cole and Buchak 1995), DYRESM (Imberger and Patterson 1981), CAEDYM (Romero et al. 2004), and WASP (Wool et al. 2003).

Not only the in-reservoir processes have focused the attention of modelers. Since reservoirs are open systems highly influenced by materials coming from the watershed, there have been numerous efforts to link watershed models and reservoir models to explore the origin of incoming materials, and how alternative scenarios in the basin could affect reservoir limnology. Although watershed modeling is an interesting topic by itself, people involved in reservoir-watershed interaction research have played a fundamental role in developing watershed models. Maybe the best example is the Environmental Laboratory of the US Army Corps of Engineers (USACE) at Vicksburg (USA), where CE-QUAL was designed, and the Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) was partially developed, with USACE reservoirs as major targets of modeling efforts. In this sense, it could be said that modelers understand the importance of watershed interactions in reservoir limnology better than many

limnologists involved in empirical research. There are a huge number of approximations to watershed modeling, although for water quality purposes dynamical semidistributed applications are the usual choice. HSPF (Bicknell et al. 2001), SWAT (Srinivasan et al. 1993), INCA (Whitehead et al. 1998), and AGNPS (Young et al. 1995) are the favorite models if biogeochemical process must be reproduced.

Finally, climate change concerns are a very good framework to develop dynamic models to explore both, implications for nutrient and other constituents fate in watersheds, and direct effects of climate change on reservoirs. However, it is worthy to mention that empirical approximations exist that are very useful tools for calculating export of materials from watersheds and alternative climatic scenarios assessment (Alexander et al. 2002b). But these approaches are only valid if results at annual or longer time steps suffice.

Apart from the model structure, underlying hypothesis, user-friendliness, and other considerations, what is relevant for modelers is what a model means. A numerical model is just a mathematical formulation feed with assumptions, inferences, and input data (*auxiliary hypotheses* in the words of Hempel and Oppenheim [1948]). Since natural systems are open systems (in the sense applied in logic reasoning), any modeling framework, despite its complexity, cannot demonstrate the truth of any proposition (Oreskes et al. 1994). Moreover, more than one model construction can match observational data (the problem of non-uniqueness). Thus, a model fitting data is not a *true* model, is just a *probable* mathematical definition of the underlying process.

Since one of the major problems with complex models in the non-uniqueness, several methodologies have been proposed to describe the degree of this problem for a given application, and to work against it. In the first case, the advances in Bayesian statistics allow modelers to fit models in a probabilistic way, obtaining a distribution of parameters and model responses, rather than a unique parameter set and model outcomes. In the second case, the usual strategy (apart from having the best model

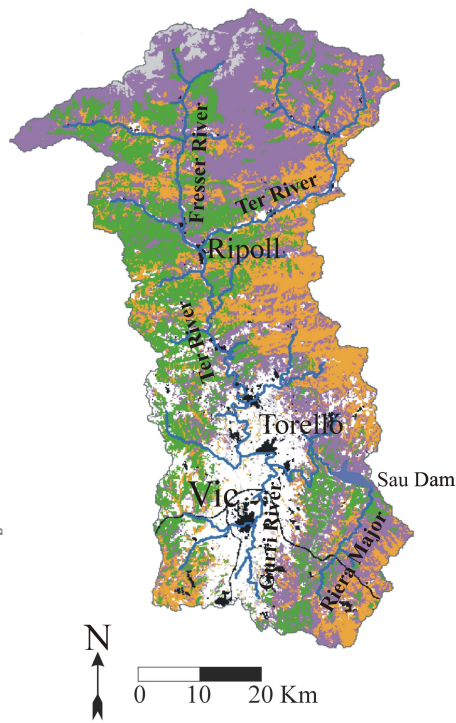
as possible) is to use several kinds of data during model calibration to avoid too much flexibility in parameter values. This dissertation will show examples of these problems and intended solutions in the context of a watershed-scale biogeochemical model.

From the above statements, a conclusion arises: we cannot validate a model. This is a common misleading term used in modeling contexts, because it seems to imply that if we validate a model (i.e. the comparison of model outcomes against observational data not used during calibration is positive), the model is a true representation of reality. But if a good fit to calibration data does not define a model as *true*, the same reasoning applies to validation data. The validation step informs us about the reliability of the model outcomes when compared with real data, but in any way confirms or tests the veracity of the model (Oreskes et al. 1994), and there is no real difference between the calibration and validation step. Thus, the primary value of models is heuristic: models are representations, useful for guiding further research but not susceptible to proof. However, in many parts of this thesis we used the term validation in the sense that is susceptible to be published by most peer-review journals, i.e. as an independent test of the model.

## Sau Reservoir-Ter Watershed system

Most data included in this dissertation come from Sau Reservoir (Spain) and its main tributary, the Ter River. Ter River watershed (only the area upstream the Sau Reservoir Dam will be considered in this dissertation) is a  $1380 \text{ km}^2$  populated area ( $109 \text{ people km}^{-2}$ ), strongly influenced by human activity. The Ter River rises at  $2400 \text{ m.a.s.l.}$  in the Pyrenees, flowing  $111 \text{ km}$  to reach the Sau Dam (Figure 1). It receives three main tributaries: Fresser River in the headwaters, Gurri river in the agricultural and farming area around Vic, and Riera Major in the reservoir basin. For a comprehensive description of the Ter River basin see Sabater et al. (1995).

Watershed characteristics vary along the river. Headwaters flow over siliceous bedrock, through



**Figure 1** – Main urban areas and rivers in the Ter watershed. Colors represent different land covers (White: crops; Green: conifer forest; Orange: deciduous mixed forest; Violet: shrubs and alpine meadows; Grey: barren land)

alpine meadows, mountain shrubs, and conifer forest communities. Although climate in the watershed is temperate Mediterranean, here climate has alpine influence, with annual rains ranging from 1000 to 1500 *mm*. Several towns not exceeding 4000 *inhabitants* maintain a moderate industrial and farming activity. From Ripoll (10 600 *inhabitants*) to Torelló (12 300 *inhabitants*) most of the land is accounted by mid-mountain conifer and deciduous forest communities, with an increasing industrial activity. The substrate is mostly calcareous with gypsum entrainments. The area comprised between Torelló and the reservoir upstream waters is a plain located at 500 *m.a.s.l.*, where non-irrigated crop fields and urban settlements (100 000 *inhabitants*) dominate the landscape. Annual rainfall ranges be-

tween 700 and 800 *mm*. The industrial and farming activity is very important (ca 1 million pigs). Most part of manures from livestock is used as fertilizer for the nearby crops. Finally, the area around the reservoir is a mid-mountain terrain with a vegetal mixture (evergreen, deciduous, conifers, shrubland), and low human density.

The hydrology shows an irregular annual pattern typical from Mediterranean rivers modulated by the influence of the Pyrenees. The annual cycle has two periods of maximum water flow in May and November, governed by snow melting and autumn rainfall, respectively (Armengol et al. 1991). The interannual variability is very conspicuous, following variability in rainfall. Ter River long-term median flow at Sau Reservoir is 10  $m^3 s^{-1}$ .

The Ter River water chemistry is the result of a complex mosaic of land covers and human activities (Sabater et al. 1990). Although human activities are spread throughout the basin (specially the ubiquitous small hydropower canalizations), the area around Vic accumulates the phosphorus sources. Industrial spills and wastewater treatment plant effluents are numerous in this area. This should be added to the phosphorus from manure application on the crops, that amounts 200  $kg P ha^{-1} yr^{-1}$ . The most impaired reaches are the tributaries in the Vic area (Gurri, Ges, and Sorreig streams). But, despite Ter River water dilutes loads from those streams, total phosphorus concentration at the gauge station near Roda de Ter frequently exceeds 0.20  $mg L^{-1}$ . Water quality assessment studies and ecological research on the Ter River and tributaries are found elsewhere (Sabater and Armengol 1986; Butturini and Sabater 1988; Sabater 1988; Sabater et al. 1989; Sabater et al. 1990; Sabater et al. 1991; Sabater and Sabater 1992; Sabater et al. 1992; Sabater et al. 1995; Espadaler et al. 1997; Guasch and Sabater 1998; Romaní and Sabater 2000; Sabater et al. 2000; Romaní and Sabater 2001; Butturini and Sabater 2002; Navarro et al. 2002; Fernandez-Turiel et al. 2003; Martí et al. 2004; Prat et al. 2004; Céspedes et al. 2006).

Sau Reservoir Dam was built in 1963 20 *km* downstream from Roda de Ter, defining a reservoir with 165  $hm^3$  of maximum capacity. Since

then, Sau Reservoir water has held a variety of interests: hydroelectric power generation, agricultural irrigation, domestic and industrial water supply to metropolitan areas, and recreational activities. In the meantime, the water body experienced a process of increasing eutrophication (Vidal and Om 1993), fed by several human activities in the basin: intensive use of fertilizers, pig and stock farming development, proliferation of industrial areas, and changes in land use (Sabater et al. 1990; Sabater et al. 1991; Vidal and Om 1993; Sabater et al. 1995; Espadaler et al. 1997). The reservoir went from moderately eutrophic during the 1970s, to severe eutrophication in the late 1980s. Wastewater treatment plants were built in main urban and industrial areas during the 1990s (Vidal and Om 1993), leading to a moderate improvement of the water quality of the reservoir.

Sau Reservoir has proven to be an excellent framework for ecological studies, including spatial heterogeneity of primary production and bacterial activity (Sommaruga et al. 1995; Šimek et al. 1998; Armengol et al. 1999; Šimek et al. 2000; Comerma et al. 2001; Šimek et al. 2001; Gasol et al. 2002; Comerma et al. 2003; Comerma et al. 2004; Nedoma et al. 2006), empirical studies of eutrophication processes (Vidal 1969; Armengol and Vidal 1988; Vidal and Om 1993), sediment diagenesis (Armengol et al. 1986), physical modeling (Han et al. 2000; Vidal et al. 2005; Rueda et al. 2006), ecological consequences of damming rivers (Puig et al. 1987), fish assemblages (Carol et al. 2006), and physical-biological coupling (Marcé et al. 2007). The reservoir was also included in the two regional studies of reservoir limnology conducted in Spain (Margalef et al. 1976; Riera 1993).

## Objectives of this study

The basic antecedent of this work is the eutrophication process in Sau Reservoir. The water supply company Aigües Ter Llobregat (ATLL) started the Sau Reservoir limnological program since it was first filled in 1963, gathering data that allowed several assessments of the trophic state of the reser-

voir. The most complete is the Vidal and Om (1993) study, which covers 20 years of data until the beginning of the 1990s. In this work they demonstrated that the areal chlorophyll content in the reservoir (measured as annual means) is directly related to the areal phosphorus load and the degree of stratification during summer months ( $p$ -value = 0.0004,  $R^2=0.89$ ):

$$\begin{aligned} \text{Chlorophyll-}a \text{ (mg m}^2\text{)} &= 27.8 \times L_{SRP} \\ &+ 35507.8 \times SMETS - 46.6 \end{aligned} \quad (1)$$

where  $L_{SRP}$  is the areal normalized soluble reactive phosphorus load ( $g P m^{-2}$ ), and  $SMETS$  the summer maximum epilimnetic thermal stability ( $g m^3$ ). This finding is just the application of the Dillon's (1975) model developed for lakes.

Later, wastewater treatment plants were built in main urban and industrial areas during the 1990s, and the expectation was that the reduction in nutrient loads would decrease eutrophy in the reservoir. However, although nutrient loads actually moderated, this only led to slight improvements in water quality, mainly changes in the composition of phytoplankton community. In addition, research in the reservoir has stressed the role of the microbial loop in the epilimnion (Comerma 2003), and the principal role of  $P$  limitation and of hydrolytic enzymes during nutrient uptake for primary production (Nedoma et al. 2006). Also, the possibility of having internal load of phosphorus has not been adequately assessed. All these findings suggest that we need more than nutrient input to understand the trophic dynamics of the reservoir.

**MAIN OBJECTIVE 1.** In this dissertation we want to explore the trophic dynamics of the reservoir from an original point of view (i.e. avoiding being much influenced by lake-based research). Since it is obvious that reduction in phosphorus load did not achieve the expected results concerning trophic state, we explored the role of other compounds in the development of anoxia in the bottom layers, which is a common feature of eutrophic water bod-



ies. This objective will define the first part of the thesis, developed in three chapters.

*Chapter 1.* Since the external load is a key factor for empirical models of lake and reservoir eutrophication, we review here the common approaches to calculate nutrient loads, and propose a new method especially suited to deal with watersheds under time-varying human impact.

*Chapter 2.* In this chapter we explore the driving factors of anoxia and phosphorus internal loading in the reservoir.

*Chapter 3.* Considering results in Chapter 2, we propose a new paradigm for the development of anoxia in reservoirs, using data from Sau Reservoir and other systems in the world.

Due to the fact that Sau Reservoir is a system involved in drinking water supply, and because we were a priori convinced that the watershed has a paramount influence on reservoir limnology at every time and spatial scale, our second aim was to build a watershed scale model including water and nutrients fate. This will permit future assessment of the effects of alternative watershed management scenarios on the trophic state of the reservoir, the study and prediction of ecological effects of short-term river pulses on the reservoir, and the study of the reservoir response to climate change. Of course, these endeavors ask for a dynamical reservoir model linked to the watershed model, purpose that is beyond the scope of this dissertation. Thus, these are future research plans and will not be developed within the thesis.

**MAIN OBJECTIVE 2.** We want to build a watershed model for the Ter River basin upstream Sau Reservoir, including hydrology, river water temperature, and total phosphorus river concentration as a first step to a complete biogeochemical model. However, we want to go beyond the simple exercise of building an *ad hoc* application exploring both, the

performance of new model fitting strategies to deal with complex problems, and the capacity of models to work as heuristic platforms for hypotheses comparison. This objective will define the second part of the thesis, also developed in three chapters.

*Chapter 4.* This chapter shows the development of the hydrological model, testing the performance of multiobjective fitting procedures in a complex modeling scenario.

*Chapter 5.* River temperature model development. This section uses modelization as a platform for alternative hypotheses comparison, and explores the performance of Bayesian-based fitting algorithms.

*Chapter 6.* Finally, we define a total phosphorus model for the river, and compare model formulations with information coming from empirical based research.

## Remarks on data acquisition and thesis structure

Most part of data included in this study comes from the Sau Reservoir water quality monitoring program. The water supply company Aigües Ter Llobregat (ATLL) has funded the Sau Reservoir long-term limnological program since it was first filled in 1963. Since 1994 this program is due in agreement with the research team lead by Joan Armengol at the Department of Ecology of the University of Barcelona. Some data included in this dissertation were collected during fieldwork that obviously cannot be attributed to the author. The author has collected data in Sau Reservoir and Ter River from 2001 to the present. Previous information comes mainly from the outstanding effort by Antoni Vidal (ATLL), who led the reservoir characterization from 1963 to 1994, and from fieldtrips by Marta Comerma and Juan Carlos García. The author also collected the most recent data from Foix Reservoir included in this study, but previous data

come from fieldwork by Marta Comerma, Juan Carlos García, Joan Gomà, and David Balayla.

An appreciable amount of data included in this dissertation were not collected by the author, but obtained from on-line, free-access computerized databases, or from public depositories, mainly the Agència Catalana de l'Aigua and the Servei Meteorològic de Catalunya. The Material and Methods section inside each chapter gave detailed comments on relevant data acquisition.

We warn readers that this dissertation is structured in independent chapters. Only bibliographical references and appendixes were placed in common sections at the end of the document. Thus, the reader may feel a sense of annoyance because a few methodological and introductory remarks are redundant. We sincerely apologize for this inconvenience. Chapter 1 (including Appendixes A and B) is a slightly modified version of a paper already published in *Limnology and Oceanography: Methods* (Marcé et al. 2004). The rest of the chapters are in review in different peer-reviewed journals.



