



LIFE12 ENV/ES/000685



Documento técnico de ampliación y calibración del modelo
Albufera
ACCION B3



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



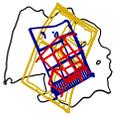
Instituto de Ingeniería del
Agua y Medio Ambiente





I. Índice General

I.	ÍNDICE GENERAL.....	I
II.	ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	V
III.	ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IX
IV.	ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
V.	NOTACIÓN Y ABREVIATURAS	XIII
1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	MOTIVACIÓN.....	1
2.	OBJETIVOS.....	5
3.	ESTADO DEL ARTE.....	7
3.1.	HERRAMIENTAS PARA LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	8
3.2.	EUTROFIZACIÓN	11
4.	METODOLOGÍA.....	15
4.1.	FORMULACIÓN Y DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE MODELACIÓN	15
4.1.1.	Introducción.....	16
4.1.2.	Hidráulica	18
4.1.3.	Concentraciones iniciales y, de entrada.....	19
4.1.4.	Procesos y constituyentes.....	20
4.1.4.1.	Temperatura	22
4.1.4.2.	Limitación por nutrientes	22
4.1.4.3.	Luz.....	23
4.1.4.4.	Oxígeno Disuelto (OD).....	24
4.1.4.5.	Materia Orgánica (DQO)	25
4.1.4.6.	Nitrógeno Orgánico (N _{org})	25
4.1.4.7.	Amonio (NH ₄ ⁺).....	25
4.1.4.8.	Nitratos (NO ₃ ⁻)	26
4.1.4.9.	Clorofila a (Chla)	27
4.1.4.10.	Fósforo Orgánico (P _{org})	28
4.1.4.11.	Fósforo Inorgánico (P _{inorg}).....	28
4.1.4.12.	Fósforo Sedimento (P _{sed}).....	29
4.1.4.13.	Fósforo Total (P _{total})	30
4.1.4.14.	Sílice (Si)	30



4.1.4.15.	Sólidos Suspendedos (SS)	31
4.1.4.16.	Conductividad (Conduc)	31
4.1.4.17.	pH	31
4.1.4.18.	Alcalinidad	33
4.1.5.	Constantes	33
4.1.6.	Integración numérica	34
4.2.	DESARROLLO DE METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO	35
4.2.1.	Función Objetivo	36
4.2.2.	Algoritmo de calibración	37
5.	CASOS DE ESTUDIO	43
5.1.	DESCRIPCIÓN DEL PARQUE NATURAL DE LA ALBUFERA	43
5.2.	PROYECTO LIFE ALBUFERA	48
5.3.	LAGO DE LA ALBUFERA DE VALENCIA	50
5.3.1.	Datos de entrada	51
5.3.2.	Resultados y calibración	54
5.3.2.1.	Hidráulica	55
5.3.2.2.	Constantes	58
5.3.2.3.	Concentraciones	58
5.3.3.	Sedimentos	63
5.4.	TANCAT DE MILIA	64
5.4.1.	Sector A: Humedal subsuperficial	66
5.4.2.	Sector B: Humedal superficial	66
5.4.3.	Sector C: Laguna	67
5.4.4.	Datos de entrada	67
5.4.5.	Resultados y calibración	68
5.4.5.1.	Hidráulica	69
5.4.5.2.	Constantes	70
5.4.5.3.	Concentraciones	71
5.4.6.	Sedimentos	81
5.5.	TANCAT DE PIPA	83
5.5.1.	Datos de entrada	83
5.5.2.	Resultados y calibración	85
5.5.2.1.	Hidráulica	86
5.5.2.2.	Constantes	87
5.5.2.1.	Concentraciones	88
5.5.3.	Sedimentos	96
5.6.	TANCAT DE L'ILLA	101



5.6.1. Datos de entrada.....	102
5.6.2. Resultados y calibración.....	103
5.6.2.1. Hidráulica	104
5.6.2.2. Constantes.....	105
5.6.2.3. Concentraciones.....	106
5.6.3. Sedimentos.....	114
6. CONCLUSIONES.....	119
7. REFERENCIAS.....	123
ANEJOS.....	131
A. CÓDIGO HUMEDAL.....	133
B. ARCHIVOS HUMEDAL.....	151
C. CÓDIGO HLR.....	153
D. CÓDIGO RNA.....	161
E. DATOS.....	163
(a) Perfiles de contaminantes tancat Milia.....	163
(b) Perfiles de contaminantes tancat de la Pipa.....	169
(c) Perfiles de contaminantes tancat L'Illa.....	175



II. Índice de Gráficas

MEMORIA

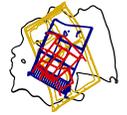
Gráfica 3-1. Estimación del estado trófico y las concentraciones de clorofila a en función de las concentraciones de fósforo total (Janus and Vollenweider, 1982).	14
Gráfica 5-1. Proporción de caudales de entrada al lago de la Albufera.	56
Gráfica 5-2. Caudales de entrada al lago de La Albufera.	56
Gráfica 5-3. Caracterización morfométrica del lago de La Albufera.	57
Gráfica 5-4. Batimétricas del lago de la Albufera.	57
Gráfica 5-5. Concentraciones de Oxígeno Disuelto en el lago de la Albufera.	59
Gráfica 5-6. Concentraciones de Nitógeno Orgánico en el lago de la Albufera.	59
Gráfica 5-7. Concentraciones de Amonio en el lago de la Albufera.	60
Gráfica 5-8. Serie de entradas de concentraciones de Nitratos.	61
Gráfica 5-9. Concentraciones de Clorofila a en el lago de la Albufera.	61
Gráfica 5-10. Concentraciones de Fósforo Orgánico en el lago de la Albufera.	62
Gráfica 5-11. Concentraciones de Fósforo Inorgánico en el lago de la Albufera.	63
Gráfica 5-12. Masa de fósforo en el sedimento del lago de la Albufera.	63
Gráfica 5-13. Calibración de Clorofila a en el Sector A del tancat de Milia.	74
Gráfica 5-14. Calibración de Clorofila a en el Sector B del tancat de Milia.	74
Gráfica 5-15. Calibración de Clorofila a en el Sector C del tancat de Milia.	74
Gráfica 5-16. Calibración de Fósforo total en el Sector A del tancat de Milia.	76
Gráfica 5-17. Calibración de Fósforo total en el Sector B del tancat de Milia.	76
Gráfica 5-18. Calibración de Fósforo total en el Sector C del tancat de Milia.	76
Gráfica 5-19. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector A del tancat de Milia.	78
Gráfica 5-20. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector B.	78
Gráfica 5-21. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector C.	78
Gráfica 5-22. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector A en el tancat de Milia.	80
Gráfica 5-23. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector B del tancat de Milia.	80
Gráfica 5-24. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector C del tancat de Milia.	80
Gráfica 5-25. Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector A del tancat de Milia.	82
Gráfica 5-26. Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector B del tancat de Milia.	82
Gráfica 5-27. Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector C del tancat de Milia.	82
Gráfica 5-28. Calibración de Clorofila a en el Sector fp1 del tancat de Pipa.	89
Gráfica 5-29. Calibración de Clorofila a en el Sector fp2 del tancat de Pipa.	89
Gráfica 5-30. Calibración de Clorofila a en el Sector fp3 del tancat de Pipa.	89
Gráfica 5-31. Calibración de Clorofila a en la laguna del tancat de Pipa.	90
Gráfica 5-32. Calibración de Fósforo total en el Sector fp1 del tancat de Pipa.	91
Gráfica 5-33. Calibración de Fósforo total en el Sector fp2 del tancat de Pipa.	91
Gráfica 5-34. Calibración de Fósforo total en el Sector fp3 del tancat de Pipa.	91
Gráfica 5-35. Calibración de Fósforo total en la laguna del tancat de Pipa.	92
Gráfica 5-36. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector fp1 del tancat de Pipa.	93
Gráfica 5-37. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector fp2 del tancat de Pipa.	93
Gráfica 5-38. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector fp3 del tancat de Pipa.	93
Gráfica 5-39. Calibración del Nitrógeno orgánico en la laguna del tancat de Pipa.	94
Gráfica 5-40. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector fp1 en el tancat de Pipa.	95
Gráfica 5-41. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector fp2 del tancat de Pipa.	95
Gráfica 5-42. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector fp3 del tancat de Pipa.	95
Gráfica 5-43. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector fp3 del tancat de Pipa.	96
Gráfica 5-44. Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector fp1 del tancat de Pipa.	98



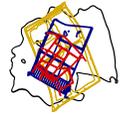
Gráfica 5-45. Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector fp2 del tancat de Pipa.	98
Gráfica 5-46 Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector fp3 del tancat de Pipa.	98
Gráfica 5-47 Masa acumulada de Fósforo en el sedimento de la laguna del tancat de Pipa.	99
Gráfica 5-48. Esquema del tancat de L'Illa.	101
Gráfica 5-49. Calibración de Clorofila a en el Sector B41 del tancat de L'Illa.	107
Gráfica 5-50. Calibración de Clorofila a en el Sector B42 del tancat de L'Illa.	107
Gráfica 5-51. Calibración de Clorofila a en el Sector B43 del tancat de L'Illa.	107
Gráfica 5-52. Calibración de Clorofila a en la laguna del tancat de L'Illa.	108
Gráfica 5-53. Calibración de Fósforo total en el Sector B41 del tancat de L'Illa.	109
Gráfica 5-54. Calibración de Fósforo total en el Sector B42 del tancat de L'Illa.	109
Gráfica 5-55. Calibración de Fósforo total en el Sector B43 del tancat de L'Illa.	109
Gráfica 5-56 Calibración de Fósforo total en la laguna del tancat de L'Illa.	110
Gráfica 5-57. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector B41 del tancat de L'Illa.	111
Gráfica 5-58. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector B42 del tancat de L'Illa.	111
Gráfica 5-59. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector B43 del tancat de L'Illa.	111
Gráfica 5-60. Calibración del Nitrógeno orgánico en la laguna del tancat de L'Illa.	112
Gráfica 5-61. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector B41 en el tancat de L'Illa.	113
Gráfica 5-62. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector B42 del tancat de L'Illa.	113
Gráfica 5-63. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector B43 del tancat de L'Illa.	113
Gráfica 5-64. Calibración de la Materia Orgánica en la laguna del tancat de L'Illa.	114
Gráfica 5-65. Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector B41 del tancat de L'Illa.	116
Gráfica 5-66. Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector B42 del tancat de L'Illa.	116
Gráfica 5-67 Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector B43 del tancat de L'Illa.	116
Gráfica 5-68 Masa acumulada de Fósforo en el sedimento de la laguna del tancat de L'Illa.	117

ANEJOS

Gráfica (Anejos) 1. Perfil de concentraciones de Oxígeno Disuelto en el tancat de Milia.	164
Gráfica (Anejos) 2. Perfil de concentraciones de Materia Orgánica en el tancat de Milia.	164
Gráfica (Anejos) 3. Perfil de concentraciones de Nitrógeno Orgánico en el tancat de Milia.	165
Gráfica (Anejos) 4. Perfil de concentraciones de Amonio en el tancat de Milia.	165
Gráfica (Anejos) 5. Perfil de concentraciones de Nitratos en el tancat de Milia.	165
Gráfica (Anejos) 6. Perfil de concentraciones de Clorofila a en el tancat de Milia.	166
Gráfica (Anejos) 7. Perfil de concentraciones de Fósforo Orgánico en el tancat de Milia.	166
Gráfica (Anejos) 8. Perfil de concentraciones de Fosfatos en el tancat de Milia.	166
Gráfica (Anejos) 9. Perfil de concentraciones de Sílice en el tancat de Milia.	167
Gráfica (Anejos) 10. Perfil de concentraciones de Sólidos Suspendidos en el tancat de Milia.	167
Gráfica (Anejos) 11. Perfil de concentraciones de Conductividad en el tancat de Milia.	167
Gráfica (Anejos) 12. Perfil de pH en el tancat de Milia.	168
Gráfica (Anejos) 13. Perfil de concentraciones de Oxígeno Disuelto en el tancat de Pipa.	169
Gráfica (Anejos) 14. Perfil de concentraciones de Materia Orgánica en el tancat de Pipa.	169
Gráfica (Anejos) 15. Perfil de concentraciones de Nitrógeno Orgánico en el tancat de Pipa.	170
Gráfica (Anejos) 16. Perfil de concentraciones de Amonio en el tancat de Pipa.	170
Gráfica (Anejos) 17. Perfil de concentraciones de Nitratos en el tancat de Pipa.	170
Gráfica (Anejos) 18. Perfil de concentraciones de Clorofila a en el tancat de Pipa.	171
Gráfica (Anejos) 19. Perfil de concentraciones de Fósforo Orgánico en el tancat de Pipa.	171
Gráfica (Anejos) 20. Perfil de concentraciones de Fosfatos en el tancat de Pipa.	171
Gráfica (Anejos) 21. Perfil de concentraciones de Sílice en el tancat de Pipa.	172
Gráfica (Anejos) 22. Perfil de concentraciones de Sólidos Suspendidos en el tancat de Pipa.	172



Gráfica (Anejos) 23. Perfil de concentraciones de Conductividad en el tancat de Pipa.....	172
Gráfica (Anejos) 24. Perfil de pH en el tancat de Pipa.....	173
Gráfica (Anejos) 25. Perfil de concentraciones de Oxígeno Disuelto en el tancat de L'Illa.....	175
Gráfica (Anejos) 26. Perfil de concentraciones de Materia Orgánica en el tancat de L'Illa.	175
Gráfica (Anejos) 27. Perfil de concentraciones de Nitrógeno Orgánico en el tancat de L'Illa. .	176
Gráfica (Anejos) 28. Perfil de concentraciones de Amonio en el tancat de L'Illa.	176
Gráfica (Anejos) 29. Perfil de concentraciones de Nitratos en el tancat de L'Illa.	176
Gráfica (Anejos) 30. Perfil de concentraciones de Clorofila a en el tancat de L'Illa.....	177
Gráfica (Anejos) 31. Perfil de concentraciones de Fósforo Orgánico en el tancat de L'Illa.	177
Gráfica (Anejos) 32. Perfil de concentraciones de Fosfatos en el tancat de L'Illa.	177
Gráfica (Anejos) 33. Perfil de concentraciones de Sílice en el tancat de L'Illa.	178
Gráfica (Anejos) 34. Perfil de concentraciones de Sólidos Suspendedos en el tancat de L'Illa.	178
Gráfica (Anejos) 35. Perfil de concentraciones de Conductividad en el tancat de L'Illa.	178
Gráfica (Anejos) 36. Perfil de pH en el tancat de L'Illa.	179



III. Índice de Ilustraciones

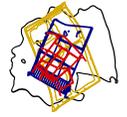
MEMORIA

Ilustración 3-1. Complejidad de los sistemas acuáticos. Modelo Humedal.....	8
Ilustración 4-1. Modelo de mezcla completa.	17
Ilustración 4-2. Curvas batimétricas, relación entre área, cota y volumen.....	19
Ilustración 4-3. Procesos, ecuaciones y constituyentes modelados con la herramienta Humedal.....	21
Ilustración 4-4. Constituyentes modelados con Humedal.	22
Ilustración 4-5. Caracterización del fósforo total almacenado en los sedimentos del lago de La Albufera.....	29
Ilustración 4-6. Estructura y pesos de la RNA para estimar el pH.	33
Ilustración 4-7. Integración numérica de concentraciones por el método de Euler.	35
Ilustración 4-8. Funcionamiento del algoritmo HLR.	38
Ilustración 4-9. Funcionamiento del algoritmo del Hipercubo Latino.....	39
Ilustración 4-10. Funcionamiento del algoritmo de Rosenbrock en un sistema bidimensional.	40
Ilustración 5-1. Presiones sobre el lago de La Albufera.	47
Ilustración 5-2. Logo y dirección web del proyecto Europeo LIFE ALBUFERA.	48
Ilustración 5-3. LIFE + ALBUFERA: Un proyecto de gobernanza (LIFE ALBUFERA, 2013).	49
Ilustración 5-4. Diagrama de los aspectos tratados en el proyecto (LIFE ALBUFERA, 2013).	49
Ilustración 5-5. Modelación integrada de humedales.	50
Ilustración 5-6. Evolución de La Albufera de Valencia [Fuente: Modificado de http://www.albufera.com/].....	50
Ilustración 5-7. Situación de los puntos de muestreo dentro de La Albufera.	52
Ilustración 5-8. Puntos de calibración en Lago de La Albufera.....	54
Ilustración 5-9. Hidrodinámica dominada por el viento.....	54
Ilustración 5-10. Modelo conceptual del balance hidráulico en la Albufera.....	55
Ilustración 5-11. Niveles, superficie y volumen del lago de La Albufera.....	57
Ilustración 5-12. Funcionamiento del humedal artificial en el tancat de Milia (LIFE_ALBUFERA, 2013).	64
Ilustración 5-13. Puntos de muestreo en el tancat de Milia, diferenciando los tres sectores. ..	65
Ilustración 5-14. Puntos de calibración en el tancat de Milia.	69
Ilustración 5-15. Modelo conceptual del balance hidráulico en el tancat de Milia.....	70
Ilustración 5-16. Esquema del tancat de la Pipa.	83
Ilustración 5-17. Puntos de calibración en el tancat de la Pipa.....	86
Ilustración 5-18. Modelo conceptual del balance hidráulico en los sectores FG del tancat de Pipa.	87
Ilustración 5-19. Modelo conceptual del balance hidráulico la laguna del tancat de Pipa.....	87
Ilustración 5-20. Puntos de calibración en el tancat de la Pipa.....	104
Ilustración 5-21. Modelo conceptual del balance hidráulico en los sectores del tancat de L'Illa.	105

ANEJOS

Ilustración (Anejos) 1. Entradas y salidas de la herramienta HUMEDAL.....	151
Ilustración (Anejos) 2. Diagrama de cálculo de la RNA.	162
Ilustración (Anejos) 3. Estructura de cálculo en la hoja de Excel.....	162
Ilustración (Anejos) 4. Constituyentes modelados con HUMEDAL.	163





IV. Índice de Tablas

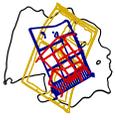
MEMORIA

<i>Tabla 3-1. Valores límite de clasificación trófica para un sistema (OECD, 1982).</i>	13
<i>Tabla 4-1. Constantes del modelo Humedal.</i>	34
<i>Tabla 4-2. Parámetros del algoritmo HLR.</i>	41
<i>Tabla 5-1. Constantes calibradas.</i>	71



V. Notación y Abreviaturas

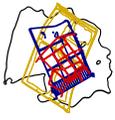
ANN	<i>Artificial neural networks</i> (Redes Neuronales Artificiales)
C	Concentración de un determinado contaminante.
CHJ	Confederación Hidrográfica del Júcar.
Chla	Concentración de clorofila <i>a</i> .
ChlaD	Concentración de clorofila <i>a</i> de las diatomeas.
Conduc	Conductividad.
D	Déficit en el caudal de salida.
DBO ₅	Demanda Biológica de oxígeno a los 5 días.
DQO	Demanda Química de oxígeno.
DMA	Directiva Marco del Agua.
DSU	Descarga de los Sistemas Unitarios.
EGCM	Ecuación General de Conservación de Materia.
EC	<i>European Communities</i> (Comisión Europea).
E _i	Término difusivo en la dirección <i>i</i> de la EGCM.
EDARs	Estaciones de Depuración de Aguas Residuales.
Evap	Evaporación en el humedal.
F _n	Factor de limitación de nutrientes para el fitoplancton general.
F _{n2}	Factor de limitación de nutrientes para el tipo de fitoplancton, diatomeas.
F _{nAn}	Factor de preferencia de las algas por el amonio frente a los nitratos.
F _p	Fracción de fósforo orgánico que se genera en la muerte del fitoplancton.
Fsed _{NH₄}	Flujo de amonio desde el sedimento.
Fsed _{NO₃}	Flujo de nitratos hacia el sedimento.
Fsed _{P_{inorg}}	Flujo de fósforo inorgánico desde el sedimento.
h	Altura de la lámina de agua.
HA	Humedales Artificiales.
HL	Algoritmo Hipercubo Latino.
HLR	Algoritmo combinado de Hipercubo Latino y Rosenbrock.
I _o	Radiación solar de onda corta neta incidente en la masa de agua.
I _{sat}	Intensidad de saturación lumínica.
K ₂₀	Valor de una determinada constante a 20 °C.



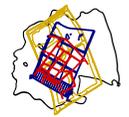
K_a	Constante de reaireación.
K_{aT}	Constante de reaireación corregida por temperatura.
K_{atemp}	Coefficiente atenuación lumínica fitoplancton.
K_b	Constante base de la atenuación lumínica.
K_d	Constante degradación de materia orgánica.
$K_{d1/20}$	Constante de semisaturación para corrección de K_d por concentraciones bajas de OD.
K_{death}	Constante muerte/respiración del fitoplancton.
K_{deathT}	Constante de muerte/respiración del fitoplancton corregida por la temperatura.
K_{desnit}	Constante de desnitrificación de los nitratos.
$K_{dn1/2}$	Constante de semisaturación para corrección de K_n por concentraciones bajas de OD.
K_{dnO}	Constante de desnitrificación corregida por la concentración de oxígeno disuelto.
K_{Esed}	Constante de eliminación de fósforo por parte del sedimento.
K_{fosfa}	Constante degradación de los fosfatos.
K_{fosfaT}	Constante de degradación de los fosfatos corregida por la temperatura.
$K_{fosforg}$	Constante degradación del fosforo orgánico.
$K_{fosforgT}$	Constante de mineralización del fosforo orgánico corregido por temperatura.
K_{grow}	Constante crecimiento del fitoplancton.
$K_{growTNL}$	Constante de crecimiento corregida por Temperatura, Nutrientes y Luz.
K_n	Constante nitrificación amonio.
$K_{n1/2}$	Constante de semisaturación para corrección de K_n por concentraciones bajas de OD.
K_{norg}	Constante degradación nitrógeno orgánico.
K_{norgT}	Constante de degradación del nitrógeno orgánico (amonificación), corregida por temperatura.
K_{nT}	Constante de nitrificación corregida por temperatura.
K_{nTO}	Constante de nitrificación, corregida por temperatura y por la concentración de oxígeno disuelto.
$K_{p1/2}$	Constante de semisaturación para corrección de K_{grow} por limitación de nutrientes. Fósforo.
$K_{s1/2}$	Constante de semisaturación para corrección de K_{grow} por limitación de nutrientes. Sílice.
K_T	Valor de una determinada constante a una temperatura T.



K_{resP}	Constante que corrige la resuspensión en función de la masa de fósforo en el sedimento.
MC	Mezcla Completa.
MMC	Método de Monte Carlo.
NH_4	Concentración de amonio.
NO_3	Concentración de nitratos.
N_{org}	Concentración de nitrógeno orgánico.
NT	Concentración de nitrógeno total.
OD	Concentración de oxígeno disuelto.
O_{sat}	Concentración de saturación de oxígeno disuelto.
P_{inorg}	Concentración de fósforo inorgánico.
P_{org}	Concentración de fósforo orgánico.
PT	Concentración de fósforo total.
P_{sed}	Masa de fósforo en el sedimento.
Q_e	Caudal de entrada.
Q_s	Caudal de salida.
r_a	Consumo de oxígeno por el proceso de nitrificación del amonio.
RCTA	Reactor Continuo de Tanque Agitado.
RNA	Red Neuronal Artificial.
r_{na}	Coefficiente estequiométrico que establece la relación entre el contenido de clorofila <i>a</i> entre la concentración de nitrógeno.
Ro_{crec}	Producción de oxígeno por mgChla en el crecimiento del fitoplancton.
Ro_{resp}	Consumo de oxígeno por mgChla en la respiración y muerte del fitoplancton.
Rpa	Coefficiente estequiométrico que establece la relación entre la clorofila <i>a</i> y la concentración de fósforo.
S	Sueltas o incremento del caudal de salida.
Sed_{NH_4}	Constante de amonio parte del sedimento.
Sed_{NO_3}	Constante de aporte de nitratos por parte del sedimento.
Sed_{Pinorg}	Constante de fosforo inorgánico por parte del sedimento.
Si	Concentración de Sílice.
SOD	Constante de consumo de oxígeno por parte del sedimento.
SS	Sólidos Suspendidos.
SSD	Sistema Soporte a la Decisión.
TRH	Tasa de Renovación Hidráulica.



TYPSA	Técnica y Proyectos S.A.
u_i	Término convectivo en la dirección i de la ECM.
USACE	<i>US Army Corps of Engineers</i> (Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos)
V	Volumen del tanque modelado.
VBA	Visual Basic Aplicaciones.
VB.NET	Visual Basic .NET
V_{S_d}	Velocidad sedimentación materia orgánica.
$V_{S_{DB05T}}$	Velocidad de sedimentación de la materia orgánica, corregida por temperatura.
$V_{S_{Fito}}$	Velocidad sedimentación del fitoplancton.
$V_{S_{FitoT}}$	Velocidad de sedimentación del fitoplancton corregida por la temperatura.
$V_{S_{Fosforg}}$	Velocidad de sedimentación fosforo orgánico.
$V_{S_{Norg}}$	Velocidad sedimentación nitrógeno orgánico.
$V_{S_{NorgT}}$	Velocidad de sedimentación del nitrógeno orgánico, corregido por temperatura.
$V_{S_{Porg}}$	Velocidad de sedimentación del fósforo orgánico.
Δt	Incremento de tiempo.



1. INTRODUCCIÓN

El Parque Natural de La Albufera de Valencia [PNAV] constituye uno de los espacios naturales más importantes de la Comunidad Valenciana, a pesar de ello, la calidad de sus aguas presenta un deterioro considerable. Uno de los principales objetivos de la Directiva Marco del Agua [DMA] (EC, 2000) es alcanzar el buen estado ecológico de las masas de agua, para ello, el análisis conjunto de cantidad y calidad del agua es una tarea imprescindible. Uno de los principales procesos que contribuyen al mal estado ecológico del lago de La Albufera es la eutrofización, que reduce la biodiversidad y empeora la calidad del agua.

Para mejorar la calidad y, en concreto, para reducir la eutrofización es muy importante disponer de las herramientas necesarias para estimar el efecto de las medidas a aplicar. Esto se traduce, en el desarrollo de metodologías para la modelación y calibración de los ecosistemas acuáticos. El desarrollo de modelos permite mejorar y facilitar la toma de decisiones, que junto con el uso de escenarios facilita el análisis y la optimización de diferentes acciones. En este tipo de sistemas complejos es necesario una visión global para una gestión conjunta entre todos los actores implicados, de modo que permita alcanzar los objetivos establecidos.

Entre las medidas que se han puesto en marcha en los últimos años están los Humedales Artificiales [HA], en los que se requiere un estudio en profundidad para la mejora de su gestión. En base a estas ideas, surge el Proyecto Europeo LIFE Albufera, en el que se realiza un estudio integral de tres HA en el ámbito del PNAV.

1.1. Motivación

El 29 de mayo de 1995, la Comisión Europea aprobó una Comunicación al Parlamento Europeo y al Consejo sobre el uso prudente y la conservación de los humedales en la que reconocía su importante función en la protección de



los recursos hídricos (EC, 2000). Es necesario realizar un esfuerzo común para coordinar a los Estados miembros y de este modo mejorar la protección de las aguas comunitarias en sus aspectos cuantitativos y cualitativos. También se fomenta su uso sostenible, contribuyendo al control de los problemas de carácter transfronterizo relativos al agua. Se centra la atención en la protección de los ecosistemas acuáticos, así como los ecosistemas terrestres y los humedales que dependen directamente de los recursos hídricos. Finalmente, se establece la necesidad de salvaguardar y desarrollar los usos potenciales de las aguas comunitarias (EC, 2000).

El objetivo de la DMA es establecer un marco para la protección de las aguas superficiales continentales, en la que se prevenga todo deterioro. Además, se especifica la necesidad de proteger y mejorar el estado de los ecosistemas acuáticos. Así como asegurar las necesidades hídricas de los ecosistemas terrestres y humedales directamente dependientes de los ecosistemas acuáticos.

Una alternativa para reducir la concentración de nutrientes y mejorar, de este modo, el estado ecológico de los ecosistemas acuáticos, es la construcción y/o mantenimiento de HA. Estos son considerados sistemas blandos de depuración de aguas, ya que llevan asociada una escasa obra civil, no consumen reactivos químicos, se integran fácilmente en el paisaje y son económicamente ventajosos (Wu et al., 2010). Por ejemplo, mediante el uso de HA se puede tratar un amplio rango de aguas residuales consiguiendo reducir de forma significativa las concentraciones de nutrientes (Kadlec and Wallace, 2009). En estudios anteriores ha quedado comprobada la capacidad de reducción de eutrofización de los humedales en términos de concentración de nutrientes (Martín et al., 2013a, 2013b).

Constatada la capacidad depuradora de este tipo de sistemas es necesario un estudio detallado además de una correcta modelación para la optimización de su gestión. Y como se pone de manifiesto en recientes documentos, los



estudios que analizan el transporte de masa a través de humedales son escasos y muchos de ellos consisten en meras recopilaciones de datos de campo, sin ningún tipo de simulación asociada. Por esta razón, es interesante desarrollar modelos para poder cuantificar y evaluar los beneficios en la calidad del agua que generan estos sistemas (Dortch and Gerald, 1995).

Desde la primeras modelaciones del movimiento y destino de contaminantes primarios del Rio Ohio (Streeter and Phelps, 1925), hasta los modelos más complejos utilizados actualmente, la comprensión y estudio de la calidad del agua ha ganado más relevancia en la gestión de los recursos hídricos. La modelación de la calidad se realiza para alcanzar el cumplimiento de objetivos ambientales y de calidad de agua. También se tiene en cuenta la observación detallada de caudales ecológicos, además de numerosos estudios del cambio climático, entre otros (Solera et al., 2014).

Por otra parte, también se deberá normalizar la participación pública y la correcta transmisión de conocimientos, ideas y conclusiones. Este tipo de ecosistemas están afectados por numerosos agentes, que a pequeña escala afectan al resultado final del medio. Por esta razón los análisis técnicos deben ser accesibles al público y, además, en ellos se debe realizar un esfuerzo extra para facilitar la comprensión de los mismos. Consiguiendo así que los usuarios que carecen de los conocimientos técnicos con los que se han obtenido los resultados o decisiones tomen parte y se involucren en la recuperación del sistema.



2. OBJETIVOS

El principal objetivo de este Documento Técnico es el desarrollo de herramientas de modelación para analizar y evaluar la calidad del agua en el ámbito del PNAV, haciendo especial énfasis en los procesos que tienen lugar en las zonas húmedas. El deterioro de las aguas en la zona de estudio y la necesidad de revertir esta situación justifica el objetivo de este documento.

Se implementará una herramienta para la modelación de humedales y de lagos someros. Se pretende implementar dicha herramienta en un lenguaje sencillo y de código abierto que sea capaz de interconectar sus resultados con otras herramientas ya desarrolladas.

La herramienta de cálculo estará orientada principalmente a la representación de procesos de eutrofización. Estos sistemas acuáticos suelen ser bastante sensibles a ciertos eventos, por lo que se pretende representar los procesos más importantes. La modelación implica necesariamente una simplificación de procesos e interacciones que se dan en la realidad, por ello la implementación de la herramienta debe ir orientada a reproducir correctamente el sistema de forma global.

Con el fin de alcanzar el objetivo principal se van a llevar a cabo las siguientes actividades:

- Estudio de los Humedales Artificiales que forman parte del proyecto.
- Recopilación de información hidrológica de los HA (caudales, niveles, régimen de bombeo).
- Recopilación de información de calidad de aguas (Físico-Químico, fitoplancton)
- Desarrollo del modelo (Basado en las ecuaciones que se emplearon en el Proyecto Final de Carrera (Belda, 2015, 2013)).
- Establecimiento de una metodología propia de calibración.
- Calibración de los modelos.



3. ESTADO DEL ARTE

Durante los últimos años, se han desarrollado numerosos modelos de calidad de agua para simular una amplia variedad de contaminantes en diversos tipos de masas de agua. En la naturaleza, el agua en estado líquido no se encuentra pura, sino que va incorporando diversas sustancias desde su caída a la superficie de la tierra como agua de lluvia hasta que llega al mar, a lo largo del ciclo del agua. La calidad del recurso afecta directamente a sus posibles usos y de forma indirecta al acceso del mismo. Desde hace relativamente poco tiempo, la mayoría de modelación se ha centrado en el estudio conjunto de la cantidad y calidad del agua siendo una gestión integrada más acorde con la realidad (Paredes and Lund, 2006).

A continuación, se realiza una breve descripción de la modelación de la calidad del agua. Además, se exponen los principales aspectos de la eutrofización, ya que es uno de los principales procesos a representar. Una correcta caracterización de los sistemas eutrofizados es imprescindible para determinar el estado trófico y proponer las medidas o actuaciones para su recuperación. Aumentar la complejidad de determinados modelos, pero sin los suficientes datos de entrada no tiene por qué mejorar la calidad de los resultados ni reducir su incertidumbre. Para una modelación responsable es necesario un equilibrio entre la cantidad de procesos a representar y los datos disponibles para ello. Aplicando los conceptos del principio de parsimonia (Kim et al., 2014; Wu et al., 2014), o navaja de Ockham, es recomendable restringir la dimensionalidad o complejidad del modelo si con un menor número de parámetros se consigue reproducir unos resultados igualmente válidos. Por esta razón, se deben centrar los esfuerzos en una correcta caracterización de procesos importantes dejando de lado pequeñas interacciones poco sensibles al sistema.



ecuación diferencial que describe la variación de concentraciones en el tiempo para un elemento diferencial de volumen corresponde con la ecuación (i). Si el sistema estudiado no es dependiente del tiempo, se tratará de un balance de materia en estado estacionario, simplificando considerablemente la ecuación. En el caso en el que los condicionantes del problema varíen con el tiempo se requerirá una resolución en transitorio.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(u_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(u_y C) - \frac{\partial}{\partial z}(u_z C) + \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(E_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + S_K \quad *(i)$$

**Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.*

Los primeros términos de la ecuación corresponden con el transporte convectivo del contaminante, que se produce por el propio movimiento del fluido. A continuación, aparecen los términos dispersivos que engloba el transporte por difusión molecular, difusión turbulenta y dispersión.

La última parte de las ecuaciones de balance corresponde con los términos de fuente/sumidero. La entrada de masa del contaminante a modelar, se realiza por medio de unas concentraciones asociadas a los caudales de entrada ($Q_e \cdot C_e$). Por otro lado, la cantidad de masa que sale del sistema se calcula en función de los caudales de salida y las concentraciones calculadas mediante el modelo ($Q_s \cdot C_s$).

Además, hay que tener en cuenta la interacción de la masa de agua con el sedimento que, en función de la sustancia a modelar, los flujos se producirán de una determinada forma. La acumulación de distintos materiales en los sedimentos de humedales, lagos y ecosistemas acuáticos revela el tipo de contaminación recibida. Los sedimentos se comportan como fuente/sumidero de sustancias disueltas o particuladas, de este modo interactúa activamente con la columna de agua (Hernández-Crespo and Martín, 2015). En determinadas ocasiones se produce una recirculación de sustancias que dificultan la reducción de determinados contaminantes.



La modelación de contaminantes no conservativos, además de los términos de entrada y salida requieren la inclusión de los términos de generación y/o desaparición de contaminante por procesos físicos, químicos y biológicos (Chapra, 2003). En el término fuente/sumidero se incluyen las ecuaciones cinéticas que caracterizan dichos procesos. En estos términos aparece la concentración del contaminante estudiado y la de cualquier otro con el que tenga algún tipo de interacción. La solución del sistema de ecuaciones queda condicionada por las interrelaciones que se describan en cada termino, por esta razón se requerirá una resolución conjunta de todas las sustancias (Paredes and Solera, 2013).

Para la modelación de lagos o sistemas acuáticos similares es imprescindible una correcta caracterización morfológica del medio. En función de las propiedades del medio se podrán realizar diferentes tipos de simplificaciones. Un parámetro fundamental es el tiempo de residencia, que consiste en la relación entre el caudal de entrada al lago y su volumen (Martín and Marzal, 1999). Aunque no se trate de valor constante, permite la clasificación de los lagos, diferenciando los que tienen tiempos de residencia superior al año de los que su valor es inferior. La influencia del tiempo de residencia afecta directamente a las concentraciones de todos los nutrientes modelados.

Otro parámetro muy importante es la profundidad, que en el caso de los lagos se clasifican en poco profundos, los que no superan los 7 metros y profundos los sobrepasan esta cifra. Esta forma de clasificación intenta distinguir entre los lagos en los que se produce una mezcla completa y los que se produce una clara estratificación. Por esta razón, sería conveniente realizar estudios para comprobar que las hipótesis de la modelación corresponden con lo que ocurre en la realidad. De forma sencilla se puede comprobar el grado de mezcla con la medición de la temperatura a diferentes profundidades y comprobar si se ha producido una estratificación térmica.



Los lagos poco profundos suelen ser considerados como sistemas de dimensión cero. La suposición básica que se realiza es la de considerar que el lago se encuentra perfectamente mezclado, gracias a las turbulencias que provocan agentes externos como el viento (Martín and Marzal, 1999).

A efectos prácticos no es necesario obtener el campo de velocidades del agua puesto que el sistema consta de un único elemento. Se considera, por lo tanto, como un Reactor Continuo de Tanque Agitado [RCTA]. Los cambios en los niveles y volúmenes del sistema vienen determinados por la diferencia entre los caudales de entrada y los de salida. El modelo matemático es el de los más sencillos que se puede plantear y se puede obtener fácilmente una solución analítica para casos concretos. Muchas herramientas de la modelación de la calidad actuales son aquellas enfocadas en este tipo de caracterización, en las que cualquier sistema natural acuático se describe en base a "cajas" o elementos conectados (Paredes, 2004).

3.2. Eutrofización

Hasta el observador más ajeno al ámbito de la calidad del agua, probablemente ha tenido la oportunidad de caminar a lo largo de las orillas de un lago que se ha convertido en una enfermiza masa verde o "sopa de guisantes" (Thomann and Mueller, 1987). Esta observación es característica de ecosistemas acuáticos afectados por procesos de eutrofización.

La eutrofización (enriquecimiento excesivo de los ecosistemas acuáticos de nutrientes que conducen a la proliferación de algas "*algal blooms*" y eventos anóxicos) es una condición persistente de las aguas superficiales y un problema ambiental generalizado (Carpenter, 2005). Si bien la eutrofización se produce de forma natural, normalmente está asociada a fuentes antropogénicas de nutrientes (Moreno et al., 2010). La eutrofización ha sido reconocida como un problema medioambiental global y que genera graves afecciones a los ecosistemas acuáticos (del Barrio Fernández et al., 2012; Onandia et al., 2015; Smith and Schindler, 2009; Wu et al., 2010; Zouiten, 2012).



Los procesos de eutrofización generan indeseables efectos secundarios. Por un lado, las concentraciones de oxígeno disuelto sufren grandes variaciones, esto se debe a una gran actividad de los productores primarios. En determinadas ocasiones, principalmente en las horas nocturnas, se producen fases anóxicas generando gran mortandad de peces y de seres vivos presentes en el medio (Lung and Larson, 1995). Se reduce de esta manera la diversidad biológica y se rompe el equilibrio en la cadena trófica, desembocando en un grave deterioro en la calidad del agua.

Numerosos estudios concluyen la necesidad de una correcta gestión del fósforo y del nitrógeno para evitar este tipo de afecciones. Aunque tanto el nitrógeno como el fósforo contribuyen a la eutrofización, la clasificación del estado trófico normalmente se basa en el nutriente que representa una limitación (Moreno et al., 2010). El fósforo suele ser el nutriente limitante y su ciclo interno retrasa la recuperación en la mayoría de los lagos, en los que se suele romper esta inercia después de 10 a 15 años (Jeppesen et al., 2005). A pesar de reducir drásticamente el vertido de nutrientes, regresar al buen estado ecológico se convierte en un proceso lento y frágil.

Las causas de la lenta recuperación, o de la no recuperación, de un estado eutrofizado son múltiples y en ocasiones no se entienden por completo. La eutrofización persistente podría ser debido a reciclaje interno de un gran depósito de fósforo en los sedimentos, lo que lleva a estados alternativos estables (Carpenter, 2005). Además en los medios afectados por la eutrofización son capaces de retroalimentarse con el fósforo que produce la muerte del fitoplancton, explicando la dificultad de recuperación de los hábitats afectados (Martín and Jurado, 2010).

El exceso de nutrientes rompe, en numerosos casos, con el equilibrio del medio acuático y afecta directamente a sus condiciones autóctonas. Esto promueve la presencia de otros contaminantes y patógenos ya que la capacidad de autodepuración del sistema se ve mermada.



Además de recibir la entrada de nutrientes antropogénicos, las aguas superficiales en todo el mundo sirven como depósitos y conducciones para numerosos contaminantes como metales pesados, pesticidas, productos farmacéuticos, hormonas y otros contaminantes no tradicionales (Smith and Schindler, 2009).

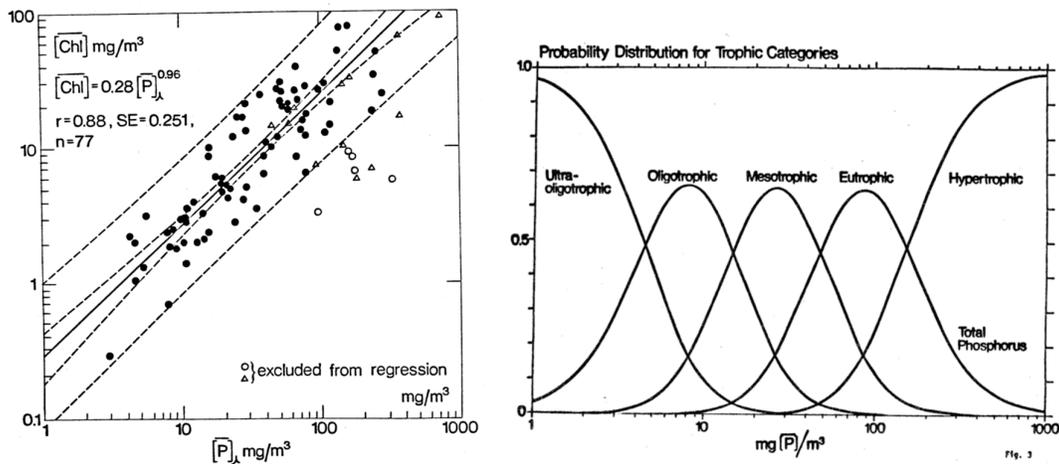
La contaminación difusa procedente de la agricultura supone una gran preocupación a escala global, sobre todo ligada a la creciente aplicación de fertilizantes y plaguicidas, que pueden provocar graves problemas de eutrofización (MMA, 2010).

En la Tabla 3-1 se muestra la clasificación trófica de un determinado sistema en función de sus concentraciones de clorofila *a*, fósforo y transparencia de Secchi (Janus and Vollenweider, 1982). Se diferencia en el caso de la clorofila *a* entre valores máximos anuales y valores medios.

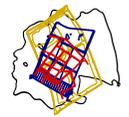
Tabla 3-1. Valores límite de clasificación trófica para un sistema (Janus and Vollenweider, 1982).

	Clorofila <i>a</i> Medias g·L ⁻¹ (mg·m ⁻³)	Clorofila <i>a</i> Máximas g·L ⁻¹ (mg·m ⁻³)	Transparencias Media de Secchi (m)	Transparencias Media de Secchi (m)	Fósforo Total mg·L ⁻¹ (g·m ⁻³)
Ultraoligotrófico	< 1	< 2.5	> 12	> 6.0	-
Oligotrófico	< 2.5	< 8.0	> 6.0	> 3.0	< 0.015
Mesotrófico	2.5 - 8	8 - 25	6 - 3	3 - 1.5	0.015 - 0.025
Eutrófico	8 - 25	25 - 75	3 - 1.5	1.5 - 0.7	0.025 - 0.100
Hipereutrófico	>25	> 75	< 1.5	< 0.7	> 0.100

En numerosos estudios, la mayoría de los lagos han mostrado un comportamiento estadístico similar en lo que respecta a las relaciones entre las concentraciones medias de clorofila *a* anual y las concentraciones de fósforo (Janus and Vollenweider, 1982).



Se puede observar en la Gráfica 3-1 que con concentraciones de $1000 \text{ mgP} \cdot \text{m}^{-3}$ ($1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) los valores medios de clorofila *a*, en el mejor de los casos, genera unas concentraciones medias superiores a los $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ($100 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$). Por esta razón, directivas como (MAGRAMA, 1991) en las que se limita el vertido de fósforo a valores inferiores a $1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ pueden no ser suficientemente restrictivas para la recuperación de los sistemas acuáticos afectados por procesos de eutrofización. La mejora en las eficiencias de recuperación de fósforo (Barat and van Loosdrecht, 2006) en los sistemas de depuración debe ser una prioridad para recuperar estos medios deteriorados.



4. METODOLOGÍA

La metodología de este documento consiste en la implementación de una herramienta propia para la modelación de la calidad del agua en humedales o sistemas someros. Para ello, se definirán todas las ecuaciones necesarias para la correcta modelación de los principales nutrientes que describen la eutrofización. Esta idea nace, como continuación del proyecto "Evaluación y propuesta de actuaciones para la mejora de la calidad del agua en el lago de La Albufera, Valencia" (Belda, 2013) en el que se modelaba el lago de La Albufera con el módulo GESCAL (Paredes, 2004) perteneciente al software AQUATOOL (Andreu et al., 1996).

La libertad del desarrollo de una herramienta propia tiene como objetivo flexibilizar la introducción de nuevos procesos y nuevas interrelaciones. La herramienta permite crear modelos mecanicistas de mezcla completa, basados en la EGCM aplicada a cada uno de los constituyentes del sistema. La implementación de este tipo de módulos de calidad de agua es necesaria para la mejora de los procesos de toma de decisiones y para una correcta gestión de los recursos hídricos (Andreu et al., 1996).

En este apartado también se explica una metodología propia para la calibración de este tipo de modelos de calidad. Realizar una buena calibración es imprescindible para una correcta caracterización del medio acuático. Y, por tanto, que los resultados de las simulaciones se ajusten al real comportamiento del sistema.

4.1. Formulación y desarrollo de la herramienta de modelación

En un primer momento se decidió realizar los cálculos en una hoja de Excel en la que el usuario, de forma sencilla, pudiera establecer las características del medio a modelar. Las restricciones implícitas de la hoja Excel, impedían un correcto funcionamiento de los cálculos necesarios y por esta razón se decidió



programar la herramienta en el lenguaje de VisualBasic.net [VB.NET]. El código de la herramienta se adjunta en el {ANEJO A} en el que están definidos todos los pasos que realiza el programa.

Se mantiene una interfaz gráfica basada en una hoja de Excel, pero ésta solo se encarga de generar los archivos necesarios de entrada para el algoritmo de cálculo. Se ha conseguido de este modo un módulo sencillo y veloz, capaz de adaptarse a gran cantidad de casos de estudios manteniendo la eficiencia de un lenguaje compilado y no interpretado.

El desarrollo de cálculo de la herramienta se basa en principios informáticos de reducción de acoplamiento y maximización de la cohesión, para facilitar de esta forma, el mantenimiento y ampliación del código. Se ha organizado de tal manera que sea sencilla la introducción de nuevos procesos a modelar. Evitando, en la medida de lo posible, la repetición de código y el uso de subrutinas con numerosas tareas.

La herramienta creada es de código abierto basado en una licencia Creative Commons. Son interesantes los cambios y el potencial de los programas abiertos que permiten al usuario trabajar con herramientas cada vez más potentes. El desarrollo de una herramienta en la que el código de programación es accesible por cualquier usuario refuerza la transparencia del programa y su potencial de uso en diferentes contextos. La continuidad de este tipo de desarrollos es más factible que otro tipo de software que no es capaz de dar soporte a los problemas que el usuario pueda identificar.

4.1.1. Introducción

El reto de programar tareas humanas sencillas ha sido y sigue siendo una ambición natural de científicos y expertos en computación, en el intento de conseguir que los ordenadores emulen el pensamiento humano, y sean capaces, basándose en elementos simples de computación, adaptarse para reproducir una gama amplia de tareas. Se hace evidente la necesidad de ahondar en el estudio de nuevas técnicas que mejoren la preservación de



estadísticos relevantes en el contexto de los sistemas de recursos hídricos (Ochoa, 2002).

Numerosos estudios justifican el uso de modelos unidimensionales en los que se simplifica la realidad asemejándola a un RCTA. En ocasiones, el principal agente que impide significativos gradientes espaciales de concentraciones es la acción del viento. La hidrodinámica de la mayoría de lagunas someras está completamente dominada por la acción del viento y esto se traduce en unas concentraciones homogéneas. Esto no quiere decir que no existan ciertas variaciones espaciales en las concentraciones, aunque es una simplificación justificable. En determinadas situaciones y bajo la influencia de ciertos procesos podrían generarse heterogeneidades, por esta razón es importante el continuo análisis de los datos muestreados.

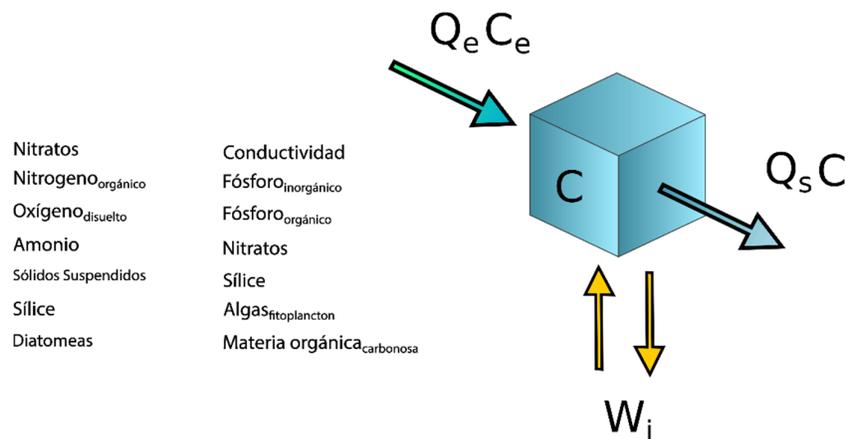


Ilustración 4-1. Modelo de mezcla completa.

El modelo conceptual de la herramienta es sencillo y se basa en la EGCM de modo que se facilita la implementación de este tipo de sistemas. Se modelan las entradas al sistema por medio de series temporales, una de caudales y otra de las concentraciones de nutrientes a calcular. Las caudales de salidas se calculan a partir de un balance entre el volumen y el caudal de entrada, ambos conocidos. Finalmente se obtienen los niveles y la superficie del sistema en función de las curvas batimétricas que caracterizan al medio.



La metodología de cálculo del pH y de la Alcalinidad, después de realizar diferentes pruebas, se ha optado por el uso de una Red Neuronal Artificial [RNA], dado respuesta a los ciclos de pH que se dan en PNAV. El código de la función de cálculo de la RNA se encuentra en el {ANEJO D}.

4.1.2. Hidráulica

En este apartado se establecen las relaciones del balance hídrico necesarias para calcular los flujos de agua en el tanque, además la herramienta permite modelar varios tanques interconectados. Se introducen dos nuevos términos, el de déficit y el de sueltas. El déficit establece una restricción del caudal de salida si el volumen del tanque está por debajo del volumen observado. En cambio, si el estado del tanque supera el volumen observado se aumenta en cierta medida el caudal de salida del mismo. De este modo el resultado de la simulación son unos volúmenes ajustados a la curva de volumen calculada en función de los niveles observados.

Se gestiona como si fuera un embalse con unas reglas de operación que consigan reproducir los niveles observados en el medio. La mayoría de las reglas de operación de un embalse están basadas en simples principios ingenieriles, como mantener llenos los embalses para el abastecimiento de agua o vaciarlos para el control de avenidas (Lund, 1996). En este caso, el objetivo consiste en reproducir la dinámica hidráulica observada en el sistema.

Para el volumen simulado, se calcula según la ecuación (ii) de balance entre las entradas y las salidas del tanque. También se puede tener en cuenta la interacción con otros tanques, cuando se simulan varios tanques interconectados. Éstos se comportan como embalses en series (Lund and Guzman, 1999) en los que los caudales de salida de unos son las entradas de los de más aguas abajo.

$$V_i = V_{i-1} + (Q_e - Q_s - Evap + D - S) \cdot \Delta t \quad *(ii)$$



**Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.*

La prioridad principal es mantener los niveles observados y calcular de este modo cuales son los caudales de salida correspondientes. De este modo, la celda se mantienen normalmente en la misma zona siempre que sea posible (Sigvaldson, 1976).

Las curvas batimétricas del sistema simulado describen las áreas y las cotas del agua en función del volumen que se haya calculado como balance de los caudales.

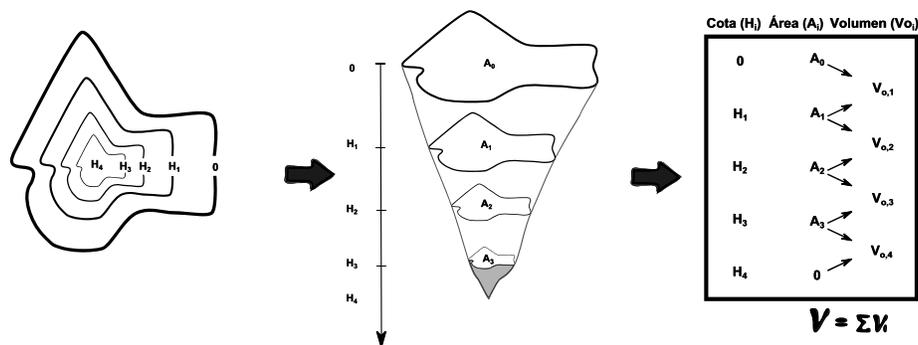


Ilustración 4-2. Curvas batimétricas, relación entre área, cota y volumen.

Es necesario aportar esta información al modelo ya que, para ciertos procesos, como en los de sedimentación, se necesita conocer los niveles asociados a un determinado volumen.

4.1.3. Concentraciones iniciales y, de entrada

Es necesario introducir las concentraciones o valores iniciales de los que parta el sistema. Asociado a cada proceso se deberá introducir una serie de valores correspondientes al periodo de simulación. Las concentraciones asociadas a los caudales de entrada deben ser introducidas por el usuario. Estos valores servirán para el cálculo de balance de materia en el sistema a modelar.

A continuación, se especifican las unidades de cada uno de los procesos a modelar:

- Oxígeno disuelto mgO·l⁻¹

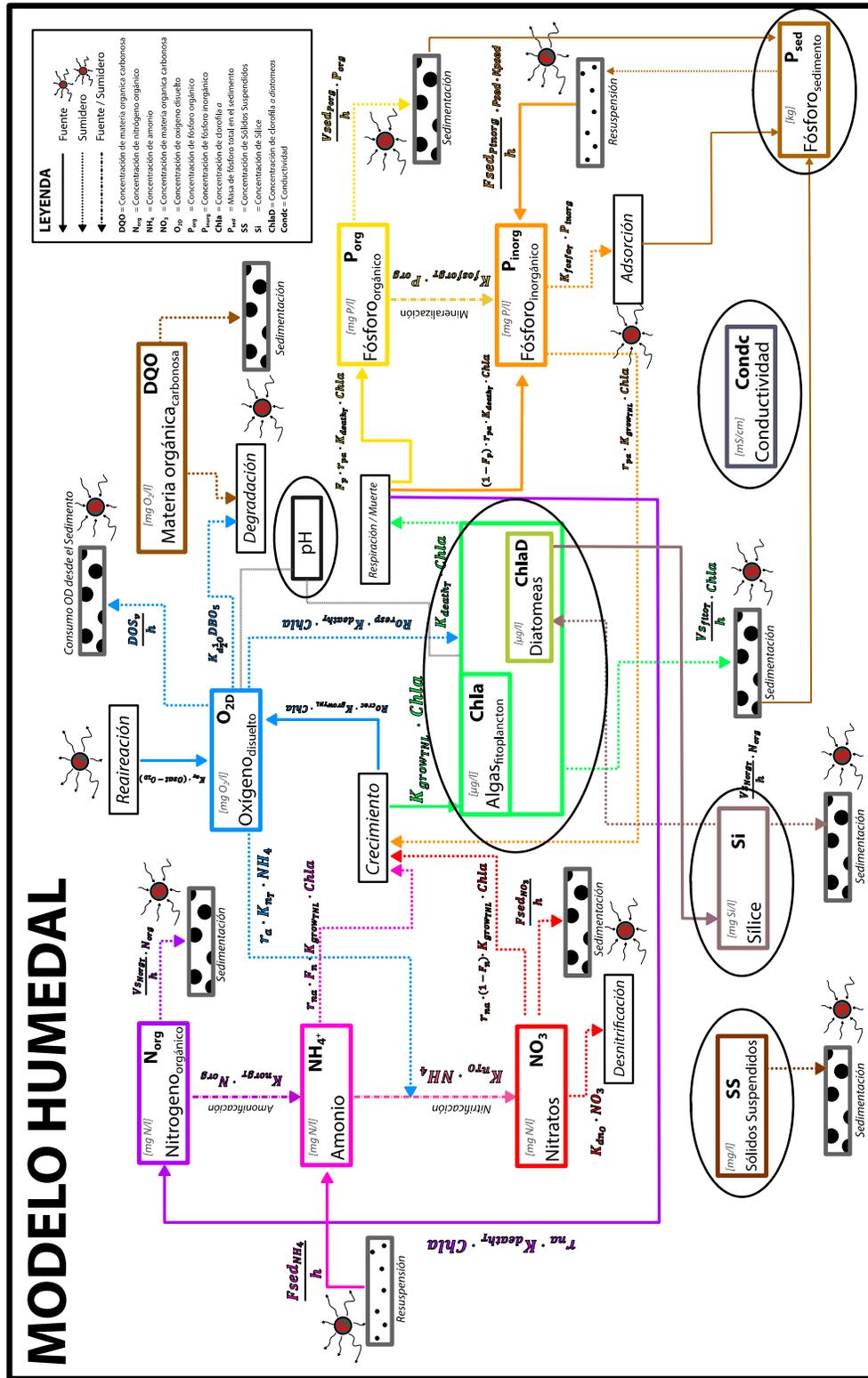
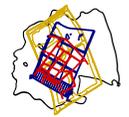


- Materia Orgánica	mgO·l ⁻¹
- Nitrógeno orgánico	mgN·l ⁻¹
- Amonio	mgN·l ⁻¹
- Nitratos	mgN·l ⁻¹
- Clorofila <i>a</i>	g·l ⁻¹ (mg·m ⁻³)
- Fósforo orgánico	mgP·l ⁻¹
- Fósforo inorgánico	mgP·l ⁻¹
- Fósforo en el sedimento	t
- Fosforo total	mgP·l ⁻¹
- Sílice	mgSi·l ⁻¹
- Conductividad	S·cm ⁻¹
- pH	-
- Alcalinidad	mg CaCO ₃ ·l ⁻¹

4.1.4. *Procesos y constituyentes*

A continuación, se muestran las ecuaciones de los términos de fuente-sumidero para cada uno de los contaminantes modelados. Se remarca de esta forma los procesos a los que está sometido cada nutriente y las interrelaciones que existen entre ellos.

Se desglosa, de forma gráfica, en la Ilustración 4-3 los contaminantes calculados con la herramienta HUMEDAL y como son los flujos de materia. Además, se redondean los nuevos procesos introducidos. De forma sencilla se puede observar de qué manera la herramienta calcula las concentraciones de cada constituyente. Se representan también las fuentes-sumideros en los que se aporta o retira materia del sistema y las relaciones mediante flechas que, dependiendo del sentido, indican el signo del proceso. Es interesante esta forma de representar el sistema de conservación de materia (Azimi et al., 2015).



Edgar Belda Ibáñez
edgarbelda@upves

Ilustración 4-3. Procesos, ecuaciones y constituyentes modelados con la herramienta Humedal.



De forma más simplificada se representan los procesos modelados con la herramienta de cálculo.

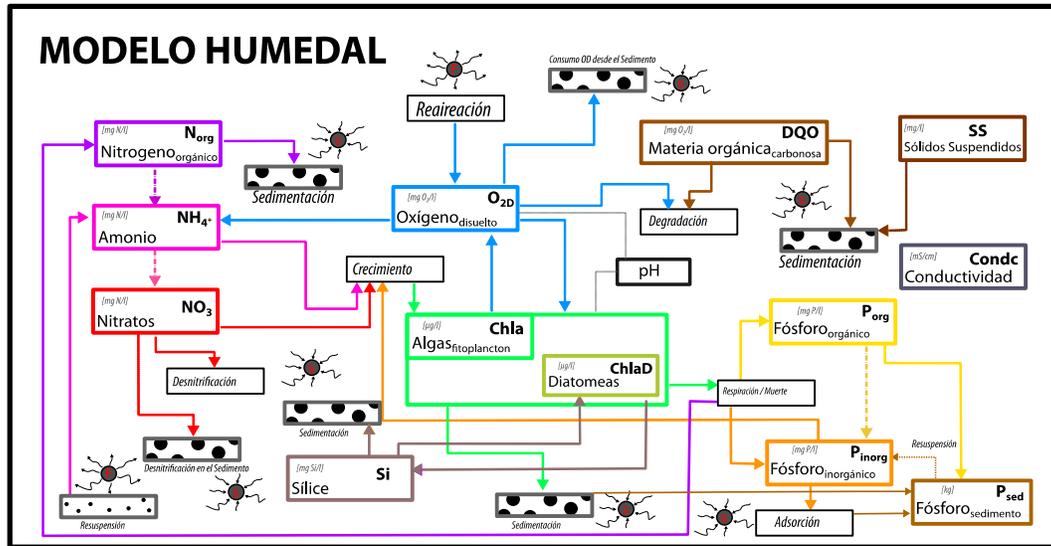


Ilustración 4-4. Constituyentes modelados con Humedal.

4.1.4.1. Temperatura

La herramienta necesita que el usuario introduzca la serie de temperaturas como entrada al modelo. Las unidades de la serie es en grados Celsius (°C).

La velocidad de las reacciones que se consideran en el modelo aumenta con la temperatura, según la ecuación de Arrhenius:

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{T-20} \text{ *(iii)}$$

*Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.

4.1.4.2. Limitación por nutrientes

La limitación de crecimiento del fitoplancton debida a la concentración de nutrientes en el medio se establece como el producto de los términos de limitación de nitrógeno y fósforo. Al optar por el producto de las dos ecuaciones, en vez de una ecuación de mínimos, el crecimiento es más sensible a la limitación de nutrientes y se ve afectado por ambos. Para estimar cada uno de ellos se utiliza la expresión de Michaelis-Menten.

$$F_n = \prod(L_{Ninorg} ; L_{Pinorg}) \text{ *(iv)}$$



$$L_{Ninorg} = \frac{(NO_3+NH_4)}{(NO_3+NH_4+K_{n1/2})}^{*(v)} \quad L_{Pinorg} = \frac{P_{inorg}}{(P_{inorg}+K_{p1/2})}^{*(vi)}$$

**Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.*

En cambio, en la limitación de crecimiento por nutrientes de las diatomeas se añade un nuevo término correspondiente a la limitación por parte de las concentraciones de sílice.

$$F_{n2} = \prod(L_{Ninorg} ; L_{Pinorg} ; L_{síllice})^{*(vii)}$$

$$L_{síllice} = \frac{Si}{(Si+K_{s1/2})}^{*(viii)}$$

**Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.*

4.1.4.3. Luz

Incorporar la limitación por radiación solar que sufre el fitoplancton es necesaria para el cálculo de clorofila a. En los lagos hipertróficos poco profundos donde la disponibilidad de luz restringe el crecimiento de macrófitas y fitoplancton bentónico, la limitación por luz es, en ocasiones, determinante (Onandia et al., 2014).

Los cálculos de limitación lumínica se basan en las ecuaciones descritas en los libros de modelación de la calidad del agua (Chapra, 1997; Thomann and Mueller, 1987). El factor introducido para tener en cuenta la limitación en el crecimiento de fitoplancton se determina a partir de la atenuación lumínica con la profundidad mediante la ley de Beer - Lambert y del efecto del nivel de luminosidad sobre el crecimiento.

$$K_e = k_b + 0.0088 \cdot Chla + 0.054 \cdot Chla^{\frac{2}{3}} \quad *(ix)$$

$$I_z = \frac{I_0}{0.5} \cdot \frac{2}{\pi} \quad *(x)$$

$$F_l = \frac{2.718}{2 \cdot k_e \cdot h} \cdot e^{\left(-\frac{I_z}{I_{sat}} \cdot e^{-k_e \cdot h}\right)} \quad *(xi)$$

**Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.*



4.1.4.4. Oxígeno Disuelto (OD)

El oxígeno disuelto es un buen indicador del estado global de la masa de agua. La presencia de oxígeno disuelto en el agua es imprescindible para el desarrollo de la vida para las especies acuáticas. De este modo, tradicionalmente se ha considerado como el parámetro más significativo para evaluar el estado y salud del ecosistema.

Una de las principales causas de disminución del oxígeno disuelto es la degradación de la materia orgánica, así como de procesos de nitrificación, también influye directamente una actividad fitoplactónica alta en el agua. Por ello, de un consumo excesivo de oxígeno puede desprenderse que en el seno del fluido se están produciendo procesos biológicos y químicos y en qué cuantía.

Se calcula también la concentración de Oxígeno disuelto en saturación en el medio mediante la fórmula (xii) propuesta en (Apha et al., 1999):

$$\ln O_{sat} = -139.34411 + 1.5757 \cdot \frac{10^5}{T} - 6.642308 \cdot \frac{10^7}{T^2} + 1.2438 \cdot \frac{10^{10}}{T^3} - 8.621949 \cdot \frac{10^{11}}{T^4}$$

*(xii)

**Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.*

Para la modelación del oxígeno disuelto se consideran los siguientes procesos:

- Consumo de oxígeno disuelto en el proceso de degradación de materia orgánica carbonosa.
- Rearieación de la masa de agua por contacto atmosférico.
- Demanda de oxígeno por parte del sedimento.
- Consumo de oxígeno disuelto en el proceso de nitrificación.
- Producción del mismo en el proceso de crecimiento mediante la fotosíntesis.
- Consumo de oxígeno en la respiración del fitoplancton.



$$S_{\text{OxígenoDisuelto}} = \left[-K_{d_2O} \cdot DQO_{(i-1)} + K_{aT} \cdot (O_{sat} - O_{2D(i-1)}) - \frac{DOS_v}{h} - r_a \cdot K_{nT} \cdot NH_{4(i-1)} + \right. \\ \left. R_{O_{crec}} \cdot K_{growTNL} \cdot Chla_{(i-1)} - R_{O_{resp}} \cdot K_{deathT} \cdot Chla_{(i-1)} \right] \quad *(xiii)$$

$$S_{\text{OxígenoDisuelto}} = [-\text{DegradaciónMO} + \text{Reaireación} - \text{DemandaOxígeno}_{\text{sedimento}} - \\ \text{Nitrificación} + \text{Crecimiento}_{\text{fito}} - \text{Respiración}_{\text{fito}}] \quad *(xiv)$$

*Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.

4.1.4.5. Materia Orgánica (DQO)

Para la modelación de la materia orgánica se tiene en cuenta la degradación por los microorganismos y la sedimentación de la fracción particulada.

$$S_{\text{MateriaOrgánica}} = \left[-K_{d_2O} \cdot DQO_{5(i-1)} - \frac{VS_{DQO}}{h} \cdot DQO_{(i-1)} \right] \quad *(xv)$$

$$S_{\text{MateriaOrgánica}} = [-\text{DegradaciónMO} - \text{Sedimentación}] \quad *(xvi)$$

*Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.

4.1.4.6. Nitrógeno Orgánico (N_{org})

Para la modelación del nitrógeno orgánico se consideran los procesos de amonificación, la producción por parte de la muerte del fitoplancton, la sedimentación del mismo.

$$S_{\text{NitrógenoOrgánico}} = \left[-K_{norgT} \cdot N_{org(i-1)} + r_{na} \cdot K_{deathT} \cdot Chla_{(i-1)} - \frac{VS_{NorgT}}{h} \cdot N_{org(i-1)} \right] \quad *(xvii)$$

$$S_{\text{NitrógenoOrgánico}} = [-\text{Amonificación} + \text{Muerte}_{\text{fito}} - \text{Sedimentación}] \cdot \Delta t \quad *(xviii)$$

*Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.

4.1.4.7. Amonio (NH_4^+)

Otro elemento que puede alterar la calidad de las aguas naturales es el nitrógeno en sus diferentes formas. Todos los organismos requieren nitrógeno para vivir y crecer; pero al igual que se verá con el fósforo, el nitrógeno utilizable es a menudo escaso en los ecosistemas. La mayor parte del nitrógeno se encuentra en la atmósfera como N_2 gas, éste es fijado por las bacterias a formas asimilables por las raíces de las plantas, e incorporado así a la cadena



alimenticia. Ésta es la manera más natural de generación de nitrógeno utilizable por organismos superiores, aunque no la única. La entrada natural del nitrógeno orgánico a las aguas es por arrastre de restos vegetales y de organismos superiores que ya incorporaron el nitrógeno a sus moléculas.

En el amonio se tienen en cuenta los siguientes procesos:

- Amonificación del nitrógeno orgánico.
- Proceso completo de nitrificación (Amonio -> Nitritos -> Nitratos)
- Consumo de nitrógeno por parte del fitoplancton para su crecimiento.
- Resuspensión del amonio sedimentado.

$$S_{\text{Amonio}} = \left[+K_{norgT} \cdot N_{org(t-1)} - K_{nTO} \cdot NH_{4(t-1)} - r_{na} \cdot F_n \cdot K_{growTNL} \cdot Chla_{(t-1)} + \frac{F_{sedNH_4}}{h} \right] \quad *(xix)$$

$$S_{\text{Amonio}} = \left[+\text{Amonificación} - \text{Nitrificación} - \text{Crecimiento}_{fito} + \text{Resuspensión} \right] \quad *(xx)$$

*Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.

4.1.4.8. Nitratos (NO_3^-)

El ion nitrato NO_3^- es un nutriente esencial para la vida ya que es la forma de nitrógeno más fácilmente asimilable por las plantas. El amonio del agua se oxida de forma natural a nitritos, NO_2 , y éstos pasan rápidamente a nitratos, es el proceso conocido como nitrificación. Concentraciones en aguas no contaminadas no suelen exceder de los 5 mg $NO_3^- \cdot L^{-1}$. Altas concentraciones suelen ser indicativas de contaminación difusa de origen agrario o ganadero.

En los nitratos se tienen en cuenta los siguientes procesos:

- Proceso completo de nitrificación (Amonio -> Nitritos -> Nitratos)
- Proceso de desnitrificación debida a bajas concentraciones de oxígeno disuelto.
- Consumo de nitrógeno por parte del fitoplancton para su crecimiento.
- Sedimentación de los nitratos.



$$S_{\text{Nitratos}} = \left[+K_{n_{\text{TO}}} \cdot \text{NH}_{4(i-1)} - K_{dn_{\text{O}}} \cdot \text{NO}_{3(i-1)} - r_{na} \cdot (1 - F_n) \cdot K_{\text{grow}_{\text{TNL}}} \cdot \text{Chla}_{(i-1)} - \frac{F_{\text{sed}_{\text{NO}_3}}}{h} \right]^{*(xxi)}$$

$$S_{\text{Nitratos}} = \left[+\text{Nitrificación} - \text{Desnitrificación} - \text{Crecimiento}_{\text{fito}} - \text{Sedimentación} \right]^{*(xxii)}$$

*Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.

4.1.4.9. Clorofila *a* (Chla)

Para evaluar el estado ambiental de un sistema acuático son utilizadas diferentes variables, entre ellas algunas de carácter biológico relacionadas con los productores primarios como el fitoplancton. La estimación de la concentración de la clorofila *a* es considerada como un indicador robusto del fitoplancton. Por su parte, la concentración de clorofila *a* se utiliza para estimar en forma indirecta la biomasa de las comunidades fitoplanctónicas ya que es el principal pigmento fotosintético presente en los diferentes grupos de algas, también es un indicador del estado fisiológico del fitoplancton y del estado trófico de los sistemas acuáticos.

En la clorofila *a* se tienen en cuenta los siguientes procesos:

- Crecimiento del fitoplancton.
- Muerte del fitoplancton.
- Sedimentación del fitoplancton.

$$S_{\text{Clorofila}} = \left[+K_{\text{grow}_{\text{TNL}}} \cdot \text{Chla}_{(i-1)} + K_{\text{death}_T} \cdot \text{Chla}_{(i-1)} + \frac{V_{\text{fito}_T}}{h} \cdot \text{Chla}_{(i-1)} \right]^{*(xxiii)}$$

$$S_{\text{Clorofila}} = \left[+\text{Crecimiento}_{\text{fito}} - \text{Muerte}_{\text{fito}} - \text{Sedimentación} \right]^{*(xxiv)}$$

*Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.

La constante $K_{\text{grow}_{\text{TNL}}}$ se ve limitada por la temperatura, la concentración de nutrientes, y factores lumínicos.



4.1.4.10. Fósforo Orgánico (P_{org})

El fósforo, al igual que el nitrógeno, es un nutriente indispensable para la vida de algas, plantas y organismos superiores de la cadena trófica. Sin embargo, en condiciones naturales es un elemento escaso en medios acuáticos, ya que no existe como gas y no supone un aporte a los sistemas acuáticos como el nitrógeno. De esta manera, en un lago no antropizado la fuente primigenia de fósforo en las aguas es la disolución de rocas fosfatadas, pero debido a su relativa poca abundancia, el fósforo se convierte en muchos casos en el nutriente limitante en los ecosistemas acuáticos. Por eso cuando se altera su equilibrio existe un riesgo de eutrofización de las masas de agua afectadas.

En el fósforo orgánico se tienen en cuenta los siguientes procesos:

- Mineralización del fósforo orgánico
- Muerte del fitoplancton
- Sedimentación del fósforo orgánico

$$S_{FósforoOrgánico} = \left[-K_{fosforg_T} \cdot P_{org(t-1)} + F_p \cdot r_{pa} \cdot K_{death_T} \cdot Chla_{(t-1)} - \frac{V_{sedporg}}{h} \cdot P_{org(t-1)} \right] \quad *(xxv)$$

$$S_{FósforoInorgánico} = \left[-Mineralización + Muerte_{fito} - Sedimentación \right] \quad *(xxvi)$$

*Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.

4.1.4.11. Fósforo Inorgánico (P_{inorg})

En el fósforo inorgánico se tienen en cuenta los siguientes procesos:

- Mineralización del fósforo orgánico.
- Degradación del fósforo inorgánico.
- Consumo de fósforo por parte del fitoplancton para su crecimiento.
- Producción de fósforo por parte de la muerte del fitoplancton.
- Muerte del fitoplancton.
- Resuspensión del fósforo inorgánico.
- Interacción con otros tanques.



$$S_{\text{FósforoInorgánico}} = \left[-K_{\text{fosfa}_T} \cdot P_{\text{inorg}(i-1)} + K_{\text{fosforg}_T} \cdot P_{\text{org}(i-1)} - r_{pa} \cdot K_{\text{grow}_{TNL}} \cdot \text{Chla}_{(i-1)} + (1 - F_p) \cdot r_{pa} \cdot K_{\text{death}_T} \cdot \text{Chla}_{(i-1)} + \frac{F_{\text{sed}_{pinorg}}}{h} \right]^{*(xxvii)}$$

$$S_{\text{FósforoInorgánico}} = \left[-\text{Degradación} + \text{Mineralización} - \text{Crecimiento}_{\text{fito}} + \text{Muerte}_{\text{fito}} + \text{Resuspensión} \right]^{*(xxviii)}$$

*Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.

4.1.4.12. Fósforo Sedimento (P_{sed})

Los resultados sugieren que la dinámica de fósforo del suelo puede controlar estados estables en los que la eutrofización puede durar siglos (Carpenter, 2005). En el caso concreto del lago de La Albufera se estiman valores elevados de resuspensión de fósforo por parte de los sedimentos almacenados durante los últimos años.

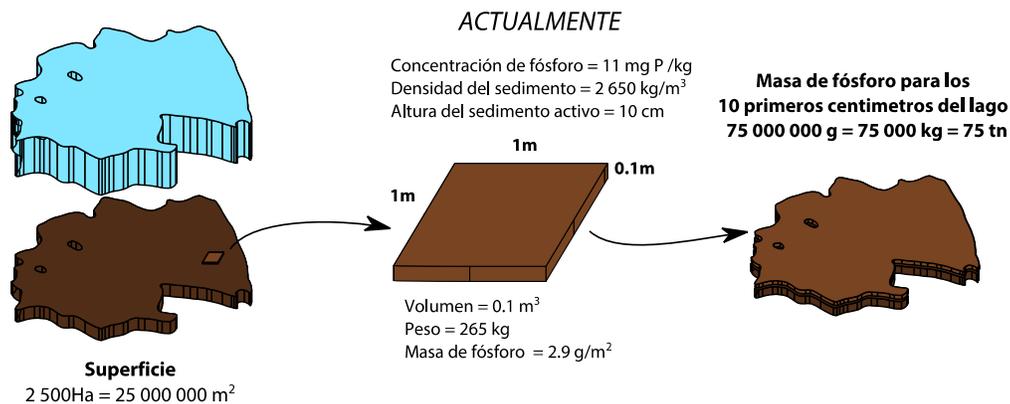


Ilustración 4-5. Caracterización del fósforo total almacenado en los sedimentos del lago de La Albufera.

En la masa de fósforo en el sedimento se tienen en cuenta los siguientes procesos:

- Sedimentación del fósforo orgánico.
- Adsorción del fósforo inorgánico.
- Sedimentación del fitoplancton.
- Resuspensión del fósforo inorgánico.
- Eliminación en el sedimento.



$$S_{FósforoSedimento} = \left[K_{fosfa_T} \cdot P_{inorg(i-1)} + \frac{Vs_{fosforg_T}}{h} \cdot P_{org(i-1)} + \frac{Vs_{fito}}{h} \cdot Chla_{(i-1)} - \frac{Fsed_{pinorg}}{h} \cdot K_{resp} \cdot P_{sed} - Ke_{sed} \cdot P_{sed} \right] \cdot V \quad *(xxix)$$

$$S_{FósforoSedimento} = \left[+Adsorción_{P_{inorg}} + Sedimentación_{P_{org}} + Sedimentación_{fito} - Resuspensión_{P_{inorg}} - Eliminación_{Sed} \right] \cdot V \quad *(xxx)$$

*Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.

4.1.4.13. Fósforo Total (P_{total})

Es importante conocer el balance completo de fósforo en el sistema. Para ello se calcula como la suma del fósforo orgánico más el fósforo inorgánico y la fracción correspondiente por parte del fitoplancton.

En la herramienta calcula el fósforo total como la suma del orgánico y el inorgánico además de la fracción contenida por el fitoplancton. La ecuación queda:

$$P_{Total} = P_{inorg} + P_{org} + \frac{Chla}{1000} \quad *(xxxi)$$

*Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.

4.1.4.14. Sílice (Si)

Para la modelación de las diatomeas es necesario calcular las concentraciones de sílice del sistema. Este nutriente es bastante conservativo y no suele presentar grandes variaciones en los medios. En el caso de las diatomeas, se incorpora a la ecuación de limitación por nutrientes. Aunque en algunos casos se realiza una distinción entre la parte orgánica y la inorgánica, en esta primera versión de la herramienta se contabiliza de forma global.

Para el cálculo de Sílice se tiene en cuenta los siguientes procesos:

- Muerte del fitoplancton, la fracción correspondiente a las diatomeas.
- Consumo por crecimiento de fitoplancton, diatomeas.
- Sedimentación de la sílice.

$$S_{Sílice} = \left[+K_{death_T} \cdot ChlaD_{(i-1)} - r_{naSi} \cdot K_{grow_{TNLSi}} \cdot ChlaD_{(i-1)} - \frac{Fsed_{Si}}{h} \right] \quad *(xxxii)$$



$$S_{\text{Silice}} = [+\text{Muerte}_{\text{fitoDiatomeas}} - \text{Crecimiento}_{\text{fitoDiatomeas}} - \text{Sedimentación}]$$

*(xxxiii)

*Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.

4.1.4.15. Sólidos Suspendidos (SS)

Los sólidos suspendidos son un contaminante bastante conservativo, aunque se ven afectados por procesos de sedimentación. Por tanto, se tiene en cuenta el balance hídrico, el término de variación de volumen y la reducción por sedimentación.

$$S_{\text{SólidosSuspendidos}} = \left[-\frac{F_{\text{sed}_{SS}}}{h} \right] \text{*(xxxiv)}$$

$$S_{\text{SólidosSuspendidos}} = [-\text{Sedimentación}] \text{*(xxxv)}$$

*Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.

4.1.4.16. Conductividad (Conduc)

La conductividad es una medida de la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica. Se mide en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y su valor es proporcional a la cantidad de sólidos disueltos en el agua.

Al tratarse de un contaminante conservativo sólo se tiene en cuenta el balance hídrico y el término de variación de volumen. No existen términos fuente/sumidero, aunque se ve afectado por la evaporación ya que esta supone una concentración de sales en el medio.

4.1.4.17. pH

Para el cálculo del pH se realiza una RNA, en la que se definen unas relaciones entre las entradas y salidas mediante unos valores denominados pesos. Estos pesos se obtienen de un proceso de aprendizaje en el que el modelo se calibra para conseguir ajustar los resultados a lo observado en la realidad. Internamente el modelo funciona con nodos y funciones de activación que codifican las entradas para convertirlas en una salida o respuesta del sistema.



Cabe destacar, que es un modelo determinista y por tanto la solución es única para una entrada concreta.

Se ha desarrollado una pequeña función en Excel que permite crear RNA con una determina estructura, el código de la función se encuentra en el {ANEJO D}. Las características de estas redes son las siguientes:

- Solo existe una capa oculta.
- De la red solo se obtiene un *output*.
- Permite introducir todos los nodos internos que se quiera.
- La función de activación es la tangente hiperbólica.
- Tanto las entradas como las salidas requieren de un proceso de homogenización.

Se han utilizado valores de muestreo del tancat de la Pipa (2009-2013) ya que la serie es más extensa y este tipo de modelos precisan de gran cantidad de datos. Los pesos de la red se obtuvieron calibrando en el punto de entrada y para el resto de puntos se validó el modelo.

La RNA cuenta con 3 entradas (Clorofila *a*, Oxígeno disuelto y Temperatura) y con 8 nodos ocultos, los pesos y la estructura se muestra en la Ilustración 4-6.

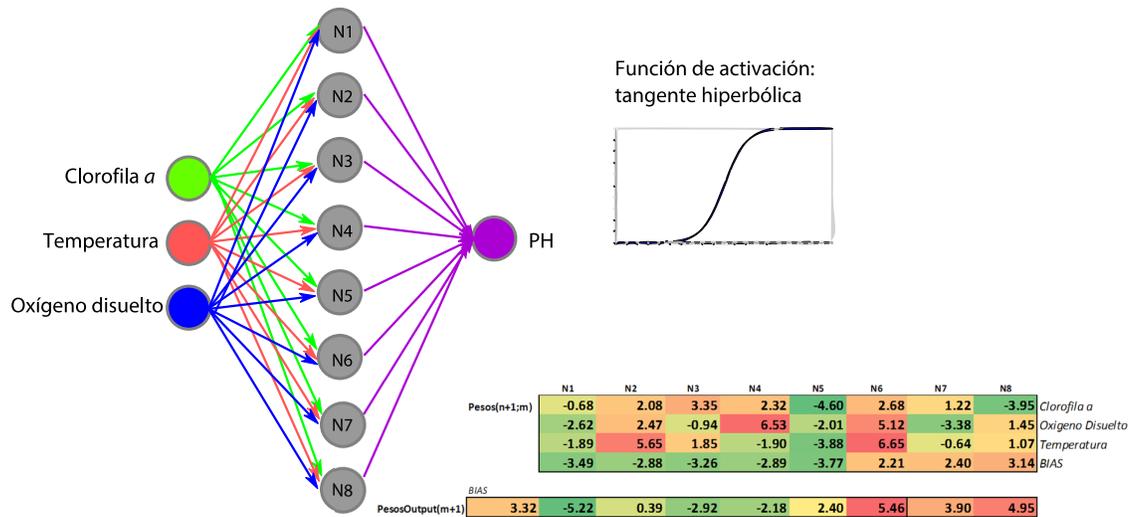


Ilustración 4-6. Estructura y pesos de la RNA para estimar el pH.

4.1.4.18. Alcalinidad

Del mismo modo que el pH, se calculan los pesos de una nueva RNA para estimar los valores de alcalinidad. La topología de la red neuronal tiene las mismas características que la utilizada para el pH.

En este caso se ha introducido una nueva entrada, que corresponde con las concentraciones de materia orgánica.

4.1.5. Constantes

En la Tabla 4-1 se muestran las constantes necesarias para el cálculo de concentraciones de la herramienta destinada a la modelación de humedales. En primer lugar, aparece el nombre abreviado que recibe dentro del código, en la segunda columna se describen las unidades correspondientes a cada constante. En las siguientes columnas aparecen los rangos habituales basados en bibliografía disponible y finalmente una breve descripción.

Algunas de ellas no suelen modificarse y presentan valores fijos para la mayoría de sistemas, a pesar de ello la herramienta permite al usuario realizar



los cambios que considere oportunos en función del sistema que desee modelar.

Tabla 4-1. Constantes del modelo Humedal.

Constantes	Unidad	Min	Max	
Ka	1/d	0	100	Constante de reaireación
T_Ka	-	1	1.1	Corrección por temperatura
Kd	1/d	0.02	3.4	Constante de degradación de la materia orgánica carbonosa
T_Kd	-	1	1.1	Corrección por temperatura
Vsd	m/d	0.01	0.36	Velocidad de sedimentación de la materia orgánica carbonosa
T_Vsd	-	1	1.1	Corrección por temperatura
Knorg	1/d	0.02	0.6	Constante de mineralización del nitrógeno orgánico
T_Knorg	-	1	1.1	Corrección por temperatura
VsNorg	m/d	0.001	0.1	Velocidad de sedimentación del nitrógeno orgánico
T_VsNorg	-	1	1.1	Corrección por temperatura
Kn	1/d	0.003	1.08	Constante de nitrificación del amonio
T_Kn	-	1	1.1	Corrección por temperatura
Kdesnit	1/d	0.001	0.1	Constante de desnitrificación de los nitratos
T_Kdesnit	-	1	1.1	Corrección por temperatura
Kdeath	1/d	0.05	0.5	Constante de muerte/respiración del fitoplancton
T_Kdeath	-	1	1.1	Corrección por temperatura
Vsfito	m/d	0	1.83	Velocidad de sedimentación del fitoplancton
T_Vsfito	-	1	1.1	Corrección por temperatura
Kfosforg	1/d	0.01	0.7	Constante de mineralización del fósforo orgánico
T_Kfosforg	-	1	1.1	Corrección por temperatura
VsFosforg	m/d	0.001	0.1	Velocidad de sedimentación del fósforo orgánico
T_VsFosforg	-	1	1.1	Corrección por temperatura
Isat	langleys	95	500	Intensidad de saturación lumínica
Kb	1/m	0.067	5	Constante base de atenuación lumínica
Katenp	l/(mg·m)			Coefficiente de atenuación lumínica del fitoplancton
Kfosfa	1/d	0.01	0.6	Constante de adsorción del fósforo inorgánico
T_Kfosfa	-	1	1.1	Corrección por temperatura
Kgrow	1/d	0.2	8.57	Constante máxima de crecimiento del fitoplancton
T_Kgrow	-	1.01	1.2	Corrección por temperatura
SOD	g/m ² /d	0		Demanda de oxígeno en el sedimento
SedNo3	g/m ² /d	0		Desnitrificación en el sedimento
SedPinorg	g/m ² /d	0		Resuspensión del fósforo inorgánico desde el sedimento
SedNh4	g/m ² /d	0		Resuspensión del amonio desde el sedimento
Kd1_2	mgO			Constante de semisaturación para corrección de Kd por concentraciones bajas de OD
Kn1_2	mgO	0.5	2	Constante de semisaturación para corrección de Kn por concentraciones bajas de OD
Knf1_2	mgN	0.025	0.04	Constante de semisaturación para corrección de Krec por limitación de nutrientes. Nitrógeno
Kp1_2	mgP	0.0005	0.03	Constante de semisaturación para corrección de Krec por limitación de nutrientes. Fósforo
kdn1_2	mgO			Constante de semisaturación para corrección de Kn por concentraciones bajas de OD
Ra	mgO/mgN			Consumo de oxígeno por mgN oxidados en la nitrificación del amonio
Roresp	mgO/mgChla			Consumo de oxígeno por mgChla en la respiración y muerte del fitoplancton
Rocrec	mgO/mgChla			Producción de oxígeno por mgChla en el crecimiento del fitoplancton
rna	mgN/mgChla	7	15	Coefficiente estequiométrico que establece la relación entre mgChla y mgN
rpa	mgP/mgChla	0.5	1	Coefficiente estequiométrico que establece la relación entre mgChla y mgP
FnAN	%	0	1	Factor de preferencia de las algas por el amonio frente a los nitratos
Fp	%	0	1	Parte del fósforo producido que es orgánico
KcompAd	1/tnP			Constante de compactación adsorción de fósforo total en el sedimento
KresP	tnP			Constante de ajuste de la resuspensión del fósforo inorgánico en función de la masa acumulada
VsedSS	m/d			Constante de Sedimentación de los sólidos suspendidos
VsedSi	m/d			Constante de sedimentación de la sílice

4.1.6. Integración numérica

Las ecuaciones diferenciales implícitas en el modelo de calidad de agua son resueltas mediante el método de Euler. Esta forma de cálculo facilita la



resolución numérica al obtener el valor de la derivada para un punto concreto y desplazarlo un incremento de tiempo.

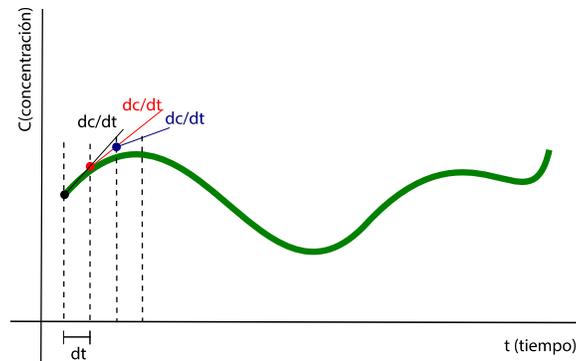


Ilustración 4-7. Integración numérica de concentraciones por el método de Euler.

A continuación, se mostrará la formulación para cada proceso simulado.

De forma genérica la mayoría de nutrientes modelados son de la siguiente forma:

$$\frac{dC_{nutr}}{dt} = \frac{1}{V} \cdot [Q_e \cdot C_{e.nutr} - Q_s \cdot C_{nutr} - C_{nutr} \cdot \frac{dV}{dt} \pm \Sigma W] \quad *(xxxvi)$$

Tomando algunas simplificaciones:

$$\frac{dV}{dt} \cong \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_i - V_{i-1}}{\Delta t} \quad V \cong \frac{V_i + V_{i-1}}{2} \quad *(xxxvii)$$

Se obtienen la siguiente ecuación por el método de Euler:

$$C_{nutr(i)} = C_{nutr(i-1)} + \frac{\Delta t}{\left(\frac{V_i + V_{i-1}}{2}\right)} \cdot [Q_e \cdot C_{e.nutr} - Q_s \cdot C_{nutr} - C_{nutr} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \pm \Sigma W] \quad *(xxxviii)$$

*Descripción de cada término en Notación y Abreviaturas.

4.2. Desarrollo de metodología para la calibración del modelo

En este apartado se explica la metodología de calibración desarrollada para para modelos de calidad de aguas. Esto último no quiere decir que no pueda utilizarse en otros ámbitos de trabajo. Incluso esta idea es una de las posibles **Error! Reference source not found.** reflejadas en el apartado correspondiente.



En primer lugar, se describe la importancia de seleccionar una correcta función objetivo que sea capaz de representar un buen ajuste. En ocasiones se utilizan funciones heredadas de otros ámbitos en los que la incertidumbre es mucho menor. Por esta razón se anima el uso de otro tipo de funciones que sean capaces de comprobar que los resultados son correctos.

Finalmente, se describe un algoritmo de optimización aplicado para la calibración de modelos de calidad de aguas. Este algoritmo se desarrolla por completo en el ámbito de este documento y se adjunta el código en Visual Basic Aplicaciones [VBA] en el {ANEJO C}.

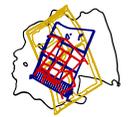
4.2.1. Función Objetivo

Escoger una Función Objetivo [FO] que represente correctamente el ajuste entre series observadas y simuladas es imprescindible para una correcta calibración automática. La calibración de un modelo consiste en la estimación de los valores de los parámetros que proporcionan el "mejor ajuste" entre las variables medidas y las simuladas por el modelo (Estrela, 1993).

Para la calibración de modelos de calidad se recomienda utilizar una FO basada en indicadores estadísticos (Belda, 2015, 2013) ya que los valores observados llevan asociados un alto nivel de incertidumbre.

En la aplicación de algoritmos de calibración se suele distinguir entre los que son de estimación determinísticos y los que son de estimación estadísticos. En el primer caso se considera que la variable medida es perfectamente conocida y por tanto los valores simulados deben ajustarse a los observados (Estrela, 1993). Esta situación no es habitual en los modelos de calidad ya que los muestreos tienen asociado un cierto grado de incertidumbre. Por tanto, en este tipo de casos se deben utilizar los de estimación estadística.

En este caso se recomienda la comparación de indicadores estadísticos entre la serie de simulados y la de observados para comprobar si los resultados se ajustan a la realidad.



4.2.2. Algoritmo de calibración

La combinación del Hipercubo Latino [HL] (McKay et al., 1979) y el algoritmo de Rosenbrock (Rosenbrock, 1960), a partir de ahora [HLR], genera una herramienta potente para la optimización de problemas complejos (Ilustración 4-8). El algoritmo de HLR es capaz de discretizar el dominio y seleccionar los mejores puntos de inicio para comenzar la búsqueda de óptimos globales por medio de un eficiente algoritmo basado en el método de gradiente.

La programación del algoritmo de Rosenbrock (Rosenbrock, 1960) se ha realizado basando en el pseudocódigo del libro Técnicas de Optimización (Torner and Armesto, 2007). El código del algoritmo se encuentra en el {ANEJO C}. Las estimas de los parámetros obtenidas mediante el algoritmo de optimización de Rosenbrock producen un ajuste muy aceptable (Estrela, 1993). Éste algoritmo de búsqueda mejora el método de las direcciones axiales, en el cual si se parte de un sistema de coordenadas no idóneo el método puede tardar mucho en converger o incluso no converger. Se ha realizado pequeños cambios en la concepción del algoritmo para mejorar su eficiencia y reducir en la medida de lo posible cálculos innecesarios.

A pesar que el algoritmo de Rosenbrock es no secuencial y por tanto necesita guardar la información del pasado, esto hoy en día no supone una pérdida de eficiencia ni un problema, debido a la gran memoria de los ordenadores. Además, presenta la ventaja de poder tratar con errores puntuales importantes, en base a una correcta selección de la FO.

El algoritmo de Rosenbrock puede utilizarse tanto para maximizar o minimizar (el método original fue diseñado para minimizar) una determinada función multivariable no lineal y sin acotar. A pesar de esta última característica es posible acotar el espacio de búsqueda mediante la introducción de una no linealidad en la FO que desestime tal resultado.

El escaneo inicial del espacio de búsqueda se realiza con el algoritmo HL. Con ello se consiguen muestreos pseudoaleatorios condicionados a los anteriores.



El HL es una evolución del método de Monte Carlo [MC], en el que se consiguen distribuciones de muestreo más homogéneas con menor número de evaluaciones de la FO. Una característica importante de esta primera etapa del algoritmo es que el número de evaluaciones iniciales depende del tamaño de HL y no del número parámetros de problema.

Los mejores resultados obtenidos del HL se convierten en los puntos de inicio requeridos para el algoritmo de Rosenbrock. Es muy importante para este tipo de subrutinas seleccionar un punto de inicio cercano al óptimo. El algoritmo de Rosenbrock se basa en la búsqueda por gradiente, además tiene la peculiaridad de realizar un cambio de ejes cuando se producen fallos en todas las direcciones de búsqueda. Este cambio se realiza en base al vector definido por la dirección que mejora la FO. De este modo se consigue reorientar los ejes de búsqueda, reduciendo el número de evaluaciones y alcanzando el óptimo de forma eficiente. De forma gráfica se puede observar en la Ilustración 4-8 el funcionamiento del algoritmo del HLR.

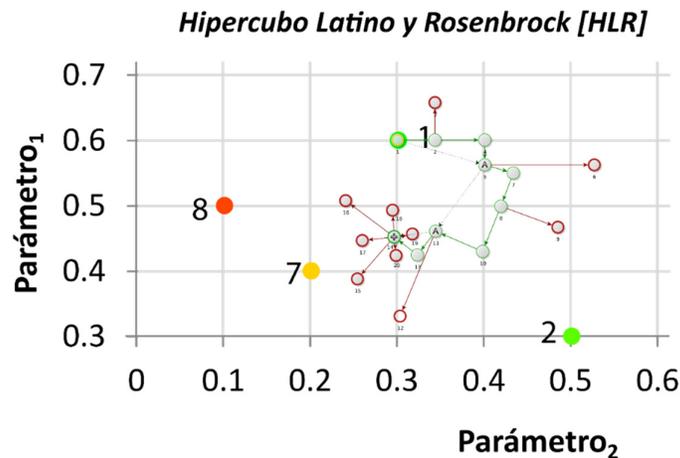
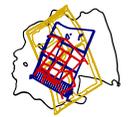


Ilustración 4-8. Funcionamiento del algoritmo HLR.

De forma resumida se describen los pasos del método del HLR:

Primer paso:



Generar muestra: Generación y evaluación de una muestra pseudoaleatoria condicionada con el algoritmo HL en base de los parámetros de este método. Si el tamaño del HL es mayor se reduce la incertidumbre en el dominio de búsqueda, para la elección de este parámetro será necesario tener en cuenta la dimensionalidad del problema.

Segundo paso:

Ordenar puntos: Los resultados obtenidos en el primer paso son ordenados. Los mejores resultados sirven como punto inicial para lanzar el algoritmo de Rosenbrock.

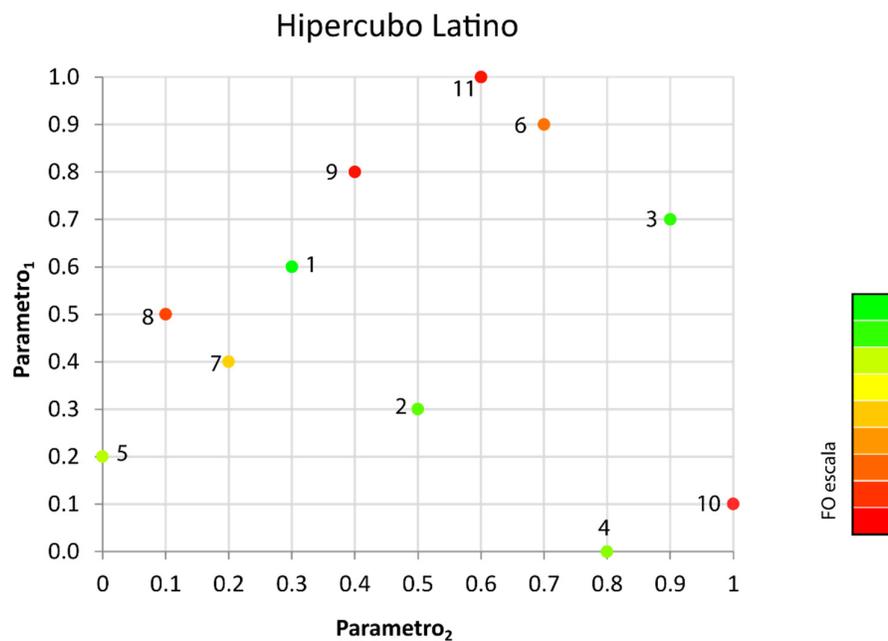


Ilustración 4-9. Funcionamiento del algoritmo del Hipercubo Latino.

Tercer paso:

Lanzamientos de Rosenbrock: El algoritmo de Rosenbrock se ejecuta como mínimo una vez. Esta subrutina busca alrededor del punto inicial de búsqueda evaluando puntos de alrededor con el propósito de mejorar la FO. En función de los resultados obtenidos se multiplican los incrementos de avance por unos coeficientes de avance o de retroceso.



Cuarto paso:

Cambio de ejes: Los ejes se reorientan cuando no se consigue mejorar los resultados obtenidos al evaluar la FO. El vector que marca el cambio de ejes es el que define la dirección en la que se han obtenido mejores resultados. Posteriormente se realiza la ortonormalización por el proceso de Gram-Schmidt para obtener una base en el sistema de coordenadas en cuestión. La condición que debe cumplirse para realizar un cambio de ejes, es que se hayan producido peores resultados en todas las direcciones de búsqueda y alguna mejora.

Quinto paso:

Óptimo: El mejor resultado de todos los lanzamientos realizados con el algoritmo de Rosenbrock es almacenado y finalmente mostrado.

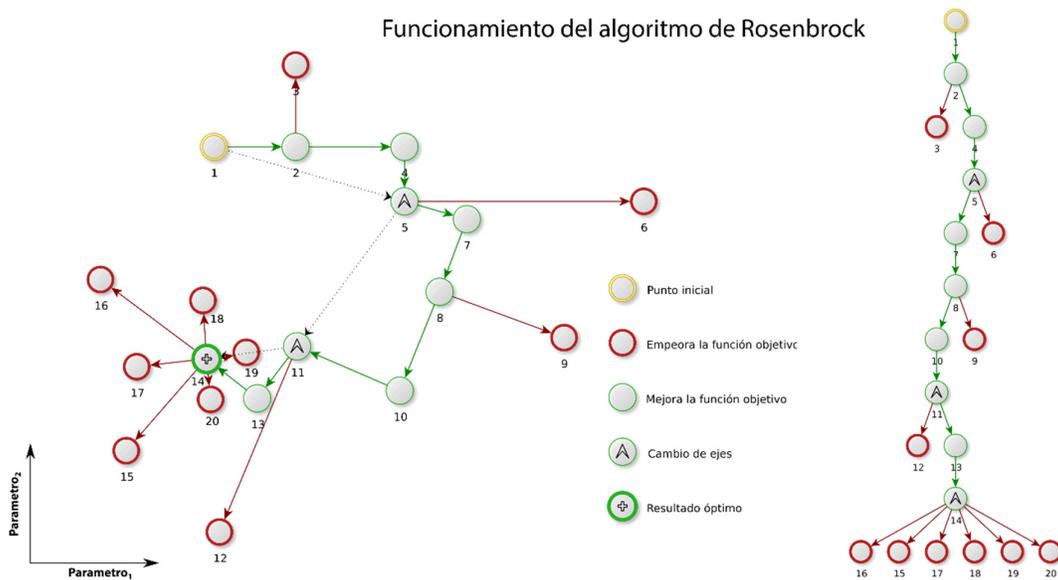


Ilustración 4-10. Funcionamiento del algoritmo de Rosenbrock en un sistema bidimensional.

Parámetros del algoritmo

El número de evaluaciones que se realizan con el algoritmo del HL es el parámetro **DivHL** (≥ 2). La semilla **SEED** es la encargada de la aleatoriedad del muestreo.



El parámetro **RLANZ** ($1 \geq \text{RLANZ} \geq \text{DivHL}$) corresponde con el número de lanzamientos que se realizan del algoritmo de Rosenbrock, usando como puntos iniciales los mejores resultados del HL.

El coeficiente **ALPHA** ($\text{ALPHA} \geq 1$) representa el aumento del paso en una determinada dirección si se ha producido un resultado positivo. En cambio, el coeficiente **BETA** ($\text{BETA} < 0$) representa un cambio de sentido y una reducción del paso.

Se define un parámetro **STEPROS** para definir los incrementos iniciales para cada dirección de búsqueda. Los pasos se calculan con la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{MaxParametroValor}_i - \text{MinParametroValor}_i}{\text{STEPROS}} = \Delta_i$$

La optimización finaliza cuando el criterio de convergencia se alcanza (definido por **ERR**), o en el caso que se alcancen el número máximo de iteraciones (**MAXN**).

Tabla 4-2. Parámetros del algoritmo HLR.

	Nombre	Descripción	Valor por defecto
	MAX	Máximo número de iteraciones	2000
	DivHL	Tamaño del Hiper cubo Latino	50
	SEED	Valor de la semilla	Aleatorio
HLR	RLANZ	Lanzamientos del algoritmo de Rosenbrock	2
	ALPHA	Coeficiente de avance	3
	BETA	Coeficiente de retroceso	-0.5
	STEPROS	Parámetro de subdivisión de rangos	40
	ERR	Parámetro de convergencia	0.001



5. CASOS DE ESTUDIO

En este apartado se comprueba el correcto funcionamiento de la herramienta de cálculo de humedales en el lago de la Albufera y en los *tancats* estudiados. En primer lugar, se realiza una pequeña descripción del PNAV y de los *tancats* del proyecto (LIFE12, 2013). También se describe brevemente el proyecto Albufera LIFE en el que se basan los datos y resultados de este documento. Finalmente se muestran los resultados de los modelos ya calibrados, comprobando y analizando su correcto funcionamiento.

5.1. Descripción del Parque Natural de La Albufera

La información que se expone a continuación puede consultarse en www.albufera.com. El Parque Natural de La Albufera de Valencia [PNAV] cuenta con 21.000 hectáreas de superficie y constituye uno de los espacios naturales más característicos de esta comunidad. Es reconocido su valor a nivel nacional e internacional y en sí mismo constituye un modelo de la interacción hombre-naturaleza en la creación de paisajes y formas de vida de gran valor e interés. La Albufera se localiza a unos 15 kilómetros del extremo sur de la ciudad de Valencia y es el lago con mayor superficie de la Península. El lago de La Albufera está alimentado por las aguas dulces de barrancos y acequias. La superficie del lago fue más extensa en el pasado debido a su tendencia a la colmatación y que los cultivos de arroz le han ido arrebatando superficie. En la actualidad puede estimarse su superficie en unas 2.800 hectáreas, incluidas las islas de vegetación.

El lago pertenece en su totalidad al término municipal de Valencia. Linda por el este con el Mar Mediterráneo por una estrecha franja de arena de unos 1.200 metros cubierta de pinares de carrasco y monte bajo, conocida como la Dehesa de El Saler, que constituye en sí misma el dique natural de la laguna que la aísla del mar. A través de la Dehesa se abren los tres canales de desagüe o también conocidos como *golas* (El Pujol, El Perellonet y El Perelló) que pueden regular mediante el uso de compuertas el nivel de las aguas en el lago. El cierre de

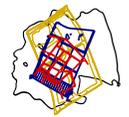


estas salidas al mar permite la inundación de los terrenos limítrofes que se dedican al cultivo de arroz. La escasez de población alrededor del lago estuvo condicionado por la dificultad de cultivo de las tierras de la zona y la incidencia de ciertas enfermedades como la malaria. El primer núcleo fue El Palmar, habitado por pescadores, que cuando la crecida de las aguas impedía sus trabajos se retiraban a sus viviendas o huertos en tierra firme.

El arrozal es un sistema que preserva la riqueza biológica del PNAV ya que mantiene una vegetación y fauna invertebrada que forma la base trófica de multitud de especies de vertebrados, en especial aves. También constituye un ambiente adicional al del lago como superficie de sustento y destaca por su función vital durante el período invernal y durante los pasos migratorios.

La Albufera de Valencia fue declarada como Parque Natural por el Decreto 89/1986 de 8 de Julio, esta declaración incluye tanto al lago como su entorno húmedo y el cordón litoral adyacente (CGV, 1986). Asimismo, ha sido incluida como área de especial protección en el ámbito comunitario e internacional. Constituye desde abril de 1991 una Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) según la Directiva Aves (CEE, 1979), está incluida desde mayo de 1990 en la Lista de Humedales de Importancia Internacional del Convenio Ramsar y posee hábitats y especies recogidos en la Directiva comunitaria conocida como "Hábitats" (CEE, 1992). También está recogida por el Protocolo de Ginebra, de 3 de abril de 1982, sobre zonas especialmente protegidas del Mediterráneo. Por sus valores excepcionales, este Parque pertenece a la Red comunitaria europea Natura 2000. Todos estos reconocimientos implican necesariamente un compromiso de conservación, y la convierten en zona destacada para una gestión sostenible.

La entrada en vigor de la Directiva 91/271/CEE (MAGRAMA, 1991), sobre el Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas, supuso la protección de las masas de aguas naturales, aplicando rendimientos mínimos en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales [EDARs] urbanas que vierten a dichas aguas



(MAGRAMA, 1991). Esta Directiva establece una protección especial a las zonas catalogadas como sensibles, en las cuales los afluentes procedentes de EDARs urbanas deben cumplir con unas concentraciones máximas de nutrientes.

Durante las últimas décadas esta zona ha sufrido una transformación importante. Lo que en un principio fue una región predominantemente rural se ha convertido en una de las áreas más dinámicas de la Comunidad Valenciana, con la consiguiente formación de problemas en el ámbito de la conservación de este espacio natural. Los núcleos que encierran al lago han sufrido un fuerte crecimiento a consecuencia tanto del desarrollo agrario, como el desarrollo turístico o industrial. Esto ha aumentado la presión urbanística, humana y por tanto ha incrementado la contaminación sobre el medio natural en especial sobre sus aguas (Pascual-Aguilar et al., 2015).

La intensificación de la agricultura y la transformación de cultivos tradicionales han originado conflictos en relación con el reparto del agua y han transformado terrenos húmedos en terrenos cubiertos de tierra. En el PNAV una de las mayores entradas de nutrientes se realiza por medio de los retornos agrícolas, ocasionando graves procesos de eutrofización de los sistemas afectados (Zouiten, 2012). La demanda consuntiva total en la Demarcación Hidrográfica del Júcar [DHJ] es de $3.157 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$, siendo la principal la demanda agraria, con $2.473 \text{ hm}^3 \cdot \text{año}^{-1}$, lo que representa un 78% de la demanda total. En el caso del PNAV uno de las mayores entradas son los retornos agrícolas que aportan grandes masas de nutrientes.

La declaración del lago de La Albufera como zona sensible se relaciona con el estado hipereutrófico de sus aguas, descrito desde hace más de 30 años (Miracle et al., 1984). También se han estudiado los factores que causaron la desaparición total de la cubierta vegetal sumergida (Onandia et al., 2015; Rodrigo and Alonso-Guillén, 2013; Rodrigo et al., 2015, 2013) y que dificultan la recuperación del lago.



A los problemas anteriores se añade el aterramiento del lago que ha dado lugar a una capa de sedimentos que en algunos puntos tiene un espesor superior a un metro. Estos sedimentos son de origen alóctono (material arrastrado por escorrentía superficial) y autóctono (fitoplancton u otros seres vivos muertos y en descomposición). Ya desde los años 70 quedó constatada su importancia como acumuladores de metales pesados y materia orgánica, lo que hace de su permanencia en el lago un factor de mantenimiento de la eutrofización.

De forma resumida se nombran las principales presiones a las que está sometido el lago de La Albufera:

- **Aguas residuales urbanas tratadas:** Se trata de los vertidos procedentes de las estaciones de depuración de aguas que, a pesar de la reducción sustancial de las concentraciones de nutrientes, no son suficientes para evitar la eutrofización. Los valores de las aguas residuales urbanas sin tratar están alrededor de los 9 mg P·l⁻¹ y los vertidos de aguas tratadas son entorno al 0.5 – 1 mg P·l⁻¹ de fósforo total, esto, a pesar de la reducción, supone una fuente de alimento para el fitoplancton y en cierto modo ayuda a mantener el estado hipereutrófico del lago.
- **Descarga de sistemas de saneamiento unitario [DSU]:** La descarga de flujos generados por las aguas pluviales una vez introducidos en la red de saneamiento unitaria se caracterizan por un aporte claro de nutrientes que van a parar a La Albufera.
- **Aguas residuales urbanas e industriales:** Actualmente, y a pesar de las numerosas mejoras en los sistemas de saneamiento y depuración, se continúan produciendo vertidos directos sin depurar de origen urbano o industrial, principalmente en el Colector Oeste, y en todos los municipios comprendidos entre Valencia y Silla, incluidos sus polígonos industriales.
- **Aportes desde los sedimentos:** Un desequilibrio entre los ciclos de oxígeno y de nutrientes y la presencia de un pH muy elevado hace que los sedimentos retengan los metales pesados y nutrientes que recibe, en



especial el fósforo, convirtiéndolos en un almacén de materia en el sistema.

- **Aportes internos:** La calidad biológica del lago se encuentra fuertemente dañada. El propio fitoplancton una vez muerto sirve de nutriente para el continuo crecimiento de éste.
- **Retornos de riego:** El uso de fertilizantes y pesticidas en la agricultura tienen un efecto directo en la calidad del lago. Los fertilizantes son nutrientes para el fitoplancton y los pesticidas reducen la biodiversidad del sistema.

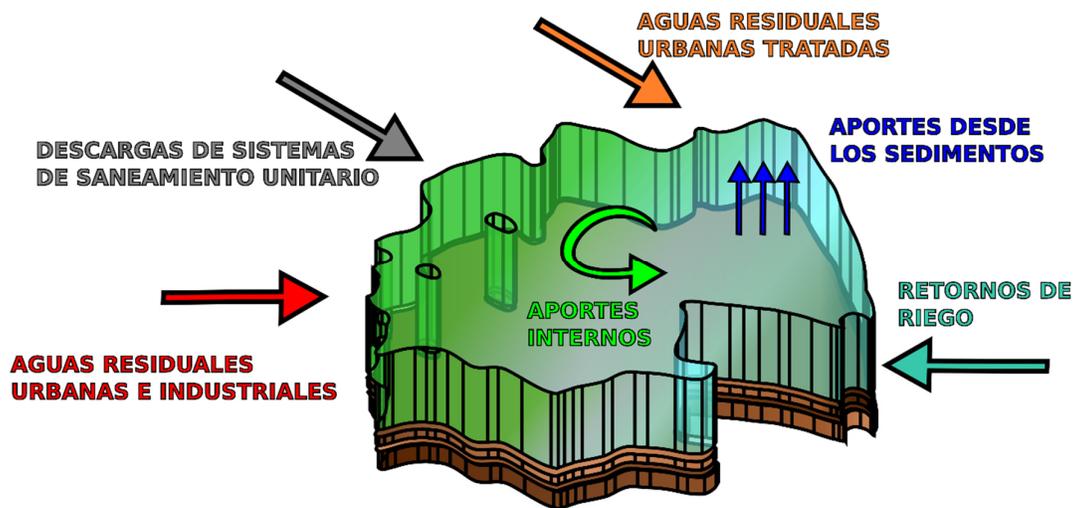


Ilustración 5-1. Presiones sobre el lago de La Albufera.

Se han desarrollado numerosos estudios del lago y de todo el parque para mejorar su estado ecológico. Entre ellos cabe destacar: la tesis doctoral "Modelación de la calidad en aguas superficiales. Aplicación al caso de La Albufera de Valencia" (Martín, 1998), también el "Estudio para el Desarrollo Sostenible de L'Albufera de Valencia" (TYPESA, 2004), al igual que la tesis doctoral "Infraestructuras y eutrofización en L'Albufera de València. El modelo CABHAL" (Mondría, 2007).

Para determinar cuáles son las actuaciones necesarias para mantener el desarrollo sostenible de la zona y procurar la mejora del ecosistema, el



Ministerio de Medio Ambiente requiere de un estudio integral del sistema. El fin de este y otros estudios es llegar a conocer el estado actual del problema y sugerir las acciones necesarias para solventarlo (Soria, 2006).

5.2. Proyecto LIFE Albufera

El Proyecto Europeo LIFE Albufera tiene como título “Gestión integrada de tres humedales artificiales en cumplimiento de las Directivas Marco del Agua, Aves y Hábitats” (LIFE ALBUFERA, 2013). Se puede consultar toda la información que se expone aquí en su página web www.lifealbufera.org (Ilustración 5-2).

El objetivo del proyecto es aumentar de forma coordinada la eficacia de los tres HA para mejorar la calidad de agua de la laguna, aportar hábitats renaturalizados y proteger las aves del humedal. Objetivos recogidos en las directivas en las que se basa su fin último.



Ilustración 5-2. Logo y dirección web del proyecto Europeo LIFE ALBUFERA.

Liderados por el Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente [IIAMA] de la Universidad Politécnica de Valencia [UPV], el resto de actores involucrados (Acció Ecologista Agró, SEO/Birdlife y la Fundación Global Nature), lanzan el proyecto LIFE Albufera, cofinanciado por ACUAMED, la Confederación Hidrográfica del Júcar [CHJ] y la Comisión Europea (a través del programa LIFE+).

En las siguientes figuras se puede observar el funcionamiento del Proyecto Europeo LIFE Albufera. Desde el diseño de la estrategia, hasta la elaboración de protocolos y transferencia de resultados.



Ilustración 5-3. LIFE + ALBUFERA: Un proyecto de gobernanza (LIFE ALBUFERA, 2013).

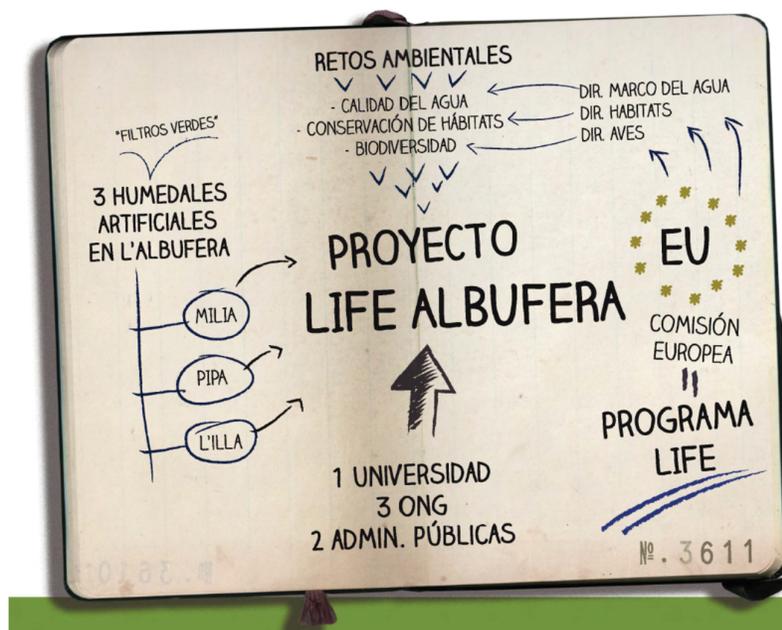


Ilustración 5-4. Diagrama de los aspectos tratados en el proyecto (LIFE ALBUFERA, 2013).

El objetivo principal de la acción B3 encargada de la modelación de la calidad del agua, es comprobar el efecto de los diferentes sistemas en el ámbito de PNAV.

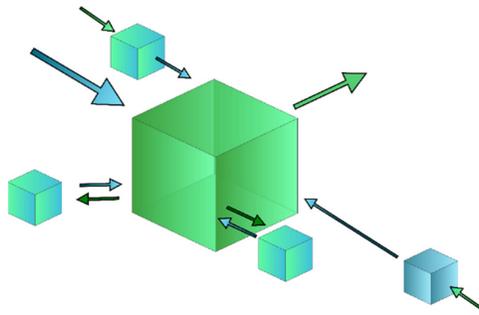


Ilustración 5-5. Modelación integrada de humedales.

5.3. Lago de La Albufera de Valencia

La formación del lago de La Albufera se remonta a principios del. Su evolución es el resultado del cierre del golfo por un amplio cordón litoral, que va desde Valencia a Cullera.

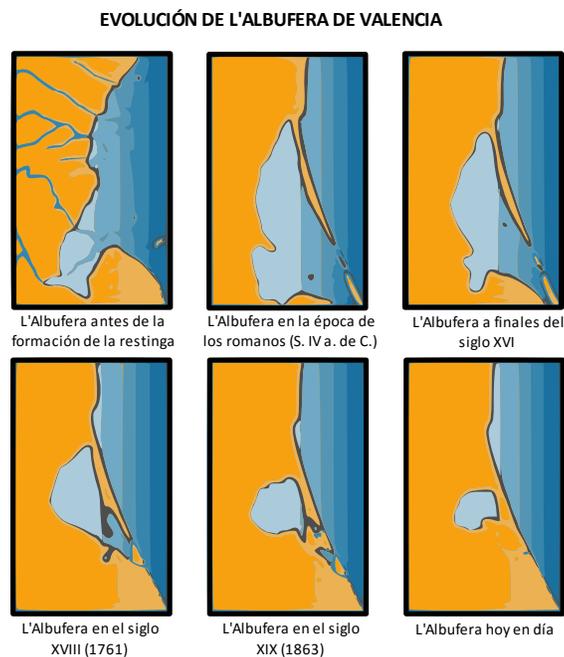


Ilustración 5-6. Evolución de La Albufera de Valencia [Fuente: Modificado de <http://www.albufera.com/>]

La formación del cordón litoral o restinga parece deberse, sobre todo, a la corriente marina de deriva ocasionada por el viento oblicuo a la costa, que aporta gran cantidad de minerales detríticos, con la consiguiente formación de una barra litoral. La corriente marina N-S que existe en ésta zona mediterránea



actúa alineando los materiales aportados. Se cree que el aporte de materiales de relleno efectuado conjuntamente por los ríos Turia y Júcar, ha favorecido la formación del cordón litoral. Actualmente la ampliación del Puerto de Valencia está modificando este comportamiento de las corrientes naturales. Los nuevos diques del Puerto frenan el aporte de sedimentos efectuado por la corriente N-S con la consiguiente pérdida de arena en la playa de El Saler.

El Lago de La Albufera con una superficie media de unas 2800 hectáreas es uno de los ambientes esenciales del Parque Natural. Se diferencian claramente dos partes, una de ellas son las aguas libres y la otra son las orillas y matas, cuyo vínculo posibilita el desarrollo de una diversidad característica de comunidades vegetales y animales.

La profundidad media es de aproximadamente 1 metro y presenta una forma prácticamente circular con un diámetro máximo de unos 6 Km. Debido al continuo proceso de colmatación ha originado una capa de sedimentos que en algunos puntos puede alcanzar 1 metro de profundidad.

5.3.1. Datos de entrada

El objetivo es describir cuáles son los datos disponibles de La Albufera de la parte de calidad, tanto de las aguas entrantes al lago como las del propio lago.

En los trabajos realizados por J.M. Soria entre 1985 y 1989 se establecen 9 puntos de muestreo cubriendo así la heterogeneidad del lago, que fueron bimestral durante 1985 y 1987, y mensual en 1986 y 1988. A partir de 1991 la CMA inicia las campañas anuales de muestreo de las aguas del lago que se han mantenido hasta la actualidad. La periodicidad es mensual, excepto en los meses de julio y agosto que suele ser quincenal. La toma se realiza en la zona superficial (primeros 50 cm).

Se determinan "in situ" el oxígeno disuelto, pH, temperatura y conductividad, profundidad, transparencia con el disco Secchi y filtración de agua para la determinación de clorofilas.

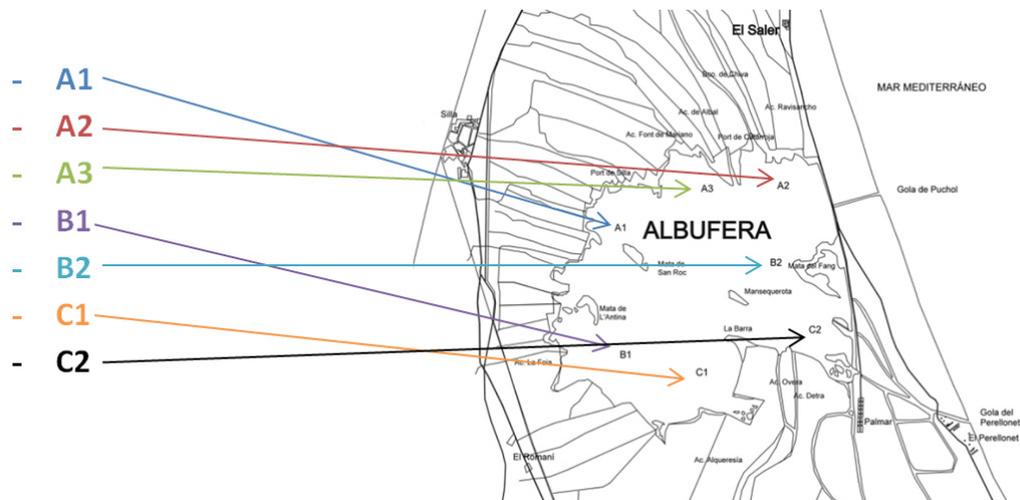


Ilustración 5-7. Situación de los puntos de muestreo dentro de La Albufera.

Los puntos de muestreo son los siguientes:

- A1: Entre la Mata de Sant Roc y l'Antina.
- A2: Entre Barranco de Massanassa y Punta de Lleveig.
- A3: Entre punta de Llebeig y la Mata del Rei.
- B1: Entre la Mata de la Barra y L'Antina.
- B2: Entre la Mata del Fang y la de Sant Roc.
- C1: Frente Tancat de Zacarés.
- C2: Entre Mata del Fang, la Barra y la Mansaguerota.

El muestreo en las acequias del lago se ha llevado a cabo con una menor intensidad que en el propio lago. La información principal disponible es la siguiente:

- Trabajos de J.M. Soria (entre 1985 y 1989).

Muestrea 23 acequias en la zona Norte y 18 en la zona Sur, determinando para cada una de ellas los siguientes parámetros:

- Medidas "in situ" (pH, T^a, conductividad, Oxígeno disuelto y Secchi)

Analizados en el Laboratorio:



- Eh (mV), Alcalinidad (meq/l), cloruro (meq/l), sulfato (μM), nitrato (μM), nitrito (μM), amonio (μM), fosfato (μM), silicato (μM), clorofila a (mg/l), carotenos (mg/l), D433/D665.

- También determina los caudales en cada acequia a la vez que realiza la toma de muestra. Por ello su información es de gran utilidad puesto que permite calcular la carga contaminante de cada sustancia que está llegando al lago.

• Trabajo de M. Martín (1995).

Se muestrean ocho acequias entre marzo y diciembre de 1995, haciendo un total de seis salidas. Además de la calidad de las aguas, se determina el caudal que circula por ellas.

• Consellería de Medi Ambient.

Se realizan cuatro muestreos al año, haciéndolo coincidir con el ciclo del cultivo del arroz, desde el año 1994. No se determinan los caudales que circulan por lo que la información aportada sólo lo es a nivel cualitativo ya que no pueden calcularse las cargas contaminantes que acceden al lago.

A partir de todas estas fuentes se puede obtener unos parámetros que caracterizan las concentraciones de los aportes de agua que circulan a través de las siguientes acequias o barrancos:

- Ravisancho.
- Barranco de Chiva.
- Puerto de Catarroja.
- Acequia de Albal.
- Font de Mariano.
- Puerto de Silla.
- Acequia la Foia.
- Acequia Alqueresia.
- Acequia Overa.



- Acequia Dreta.

5.3.2. Resultados y calibración

A pesar de que tengamos observados en diferentes partes del lago, se ha considerado un modelo de mezcla completa ya justificado en trabajos anteriores (Belda, 2013).

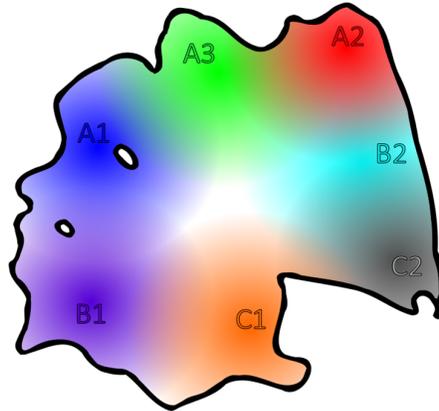


Ilustración 5-8. Puntos de calibración en Lago de La Albufera.

Se justifica un modelo de mezcla completa en función de una hidrodinámica dominada por el viento.

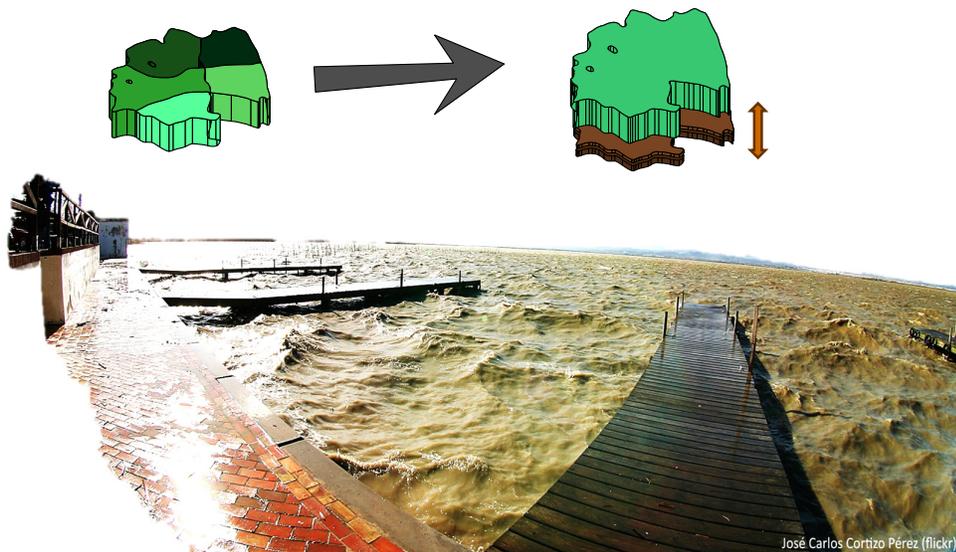


Ilustración 5-9. Hidrodinámica dominada por el viento.



5.3.2.1. Hidráulica

Se modelan una serie de caudales de entrada que corresponden a las entradas del lago por las acequias. Para simplificar el modelo, se calcula la suma de todas estas entradas y se realiza un balance de masas con las concentraciones.

La herramienta calcula los caudales de salida en función de un balance para mantener los niveles en los valores observados. De esta forma, el usuario solo se preocupa de introducir una curva de niveles y una serie de caudales.

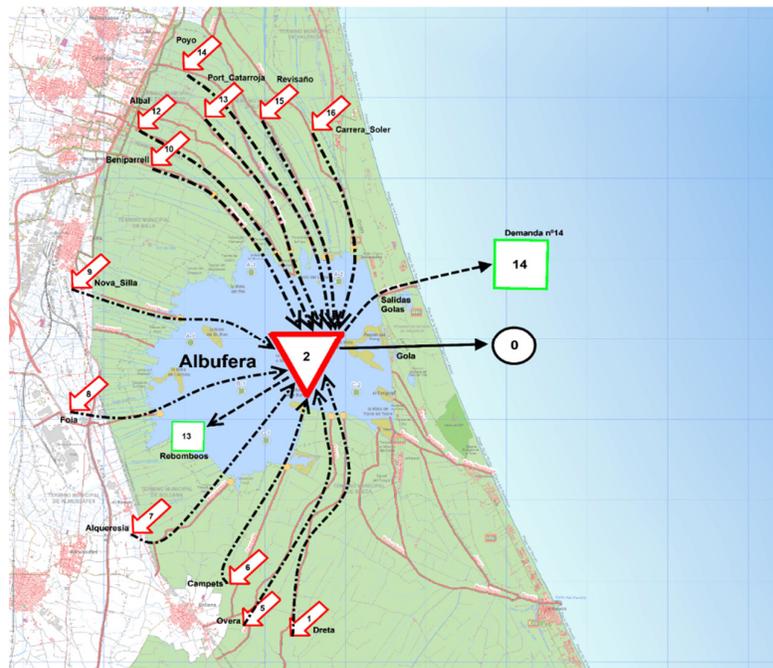


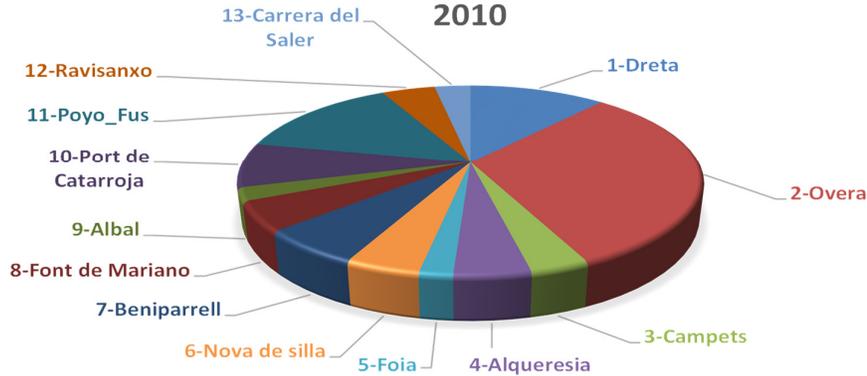
Ilustración 5-10. Modelo conceptual del balance hídrico en la Albufera.

Caudales

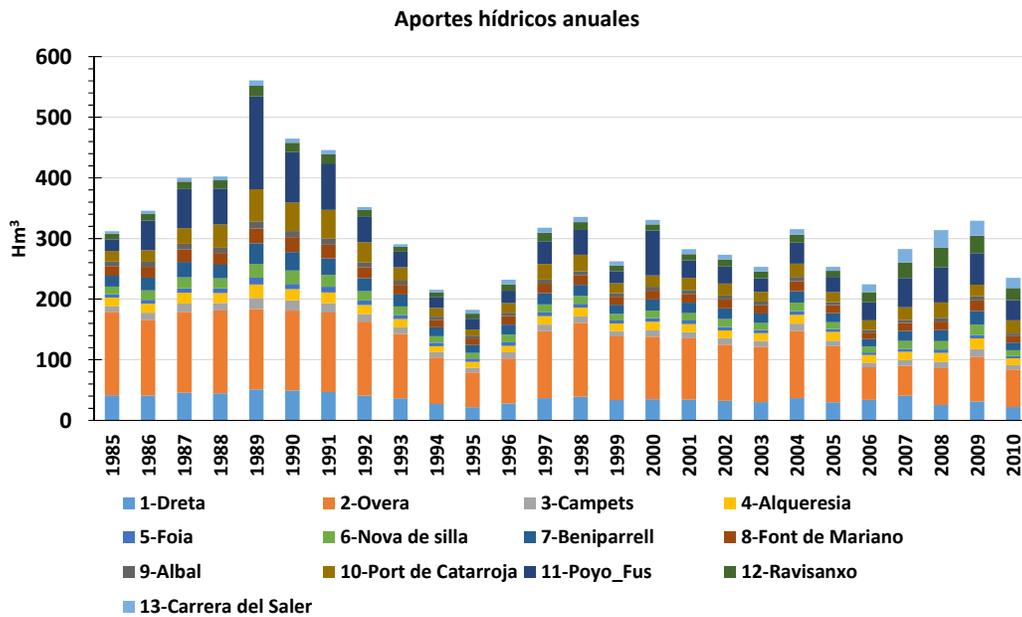
La serie de caudales de entrada se calcula con el modelo general de aportaciones calculadas con el software AQUATOOL (Andreu et al., 1996). De forma resumida se puede observar el porcentaje que representa cada una de las acequias en el modelo del lago.



VALORACIÓN DE ENTRADAS A L'ALBUFERA 1985-2010



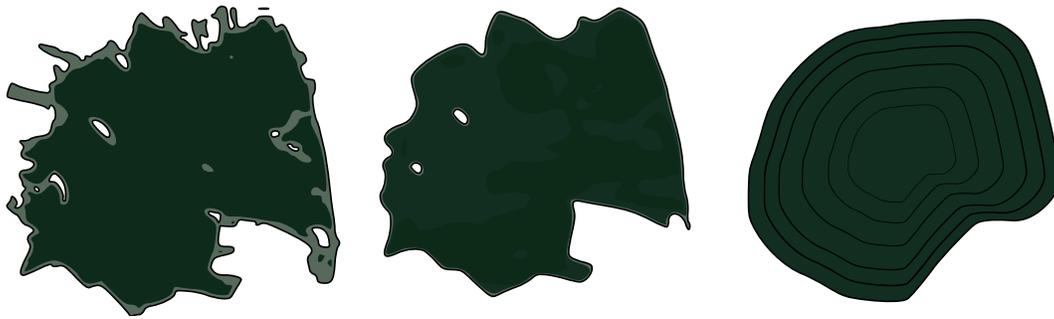
Gráfica 5-1. Proporción de caudales de entrada al lago de la Albufera.



Gráfica 5-2. Caudales de entrada al lago de La Albufera.

Volúmenes

Se introducen en el modelo las batimétricas que definen las propiedades físicas del lago de la Albufera. Se simplifica, ya que consideramos todo el lago un un TCA.



Gráfica 5-3. Caracterización morfométrica del lago de La Albufera.

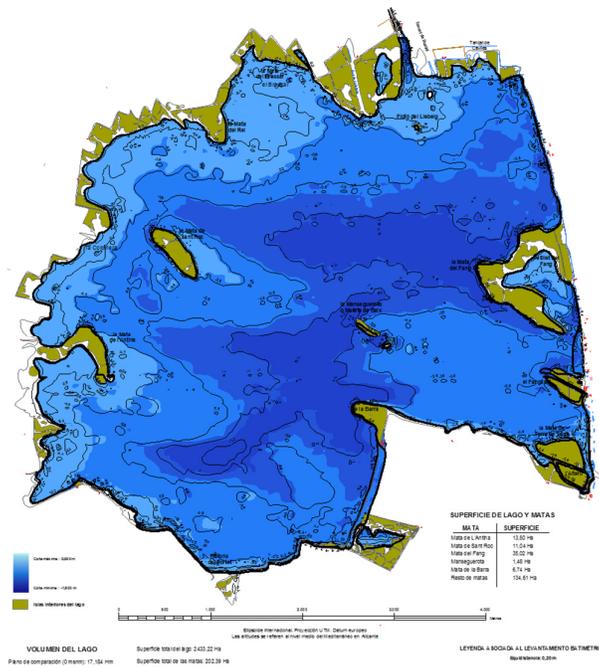
Relación de los volúmenes con el resto de variables batimétricas.

Batimétricas										
Volumen	16.824	17.968	19.118	20.277	21.44	22.615	23.792	24.985	26.242	32.314
Cota	0.7366	0.7866	0.8366	0.8866	0.9366	0.9866	1.0366	1.0866	1.1366	1.3366
Superficie	2284	2292	2308	2328	2336	2344	2364	2464	2536	2552

Ilustración 5-11. Niveles, superficie y volumen del lago de La Albufera.

Niveles

Los niveles se calcularon con el mapa de batimétricas del lago de la Albufera.



Gráfica 5-4. Batimetimétricas del lago de la Albufera.



5.3.2.2. Constantes

Se muestran a continuación las constantes calibradas para el lago de la Albufera. El significado y descripción de cada constante se describe en la metodología en la Tabla 4-1.

Tabla 5-1. Constantes calibradas para el lago de la Albufera.

Constantes -		Constantes -	
Ka	0.8	Kfosfa	0.001
T_Ka	1.024	T_Kfosfa	1.024
Kd	0.01	Kgrow	2.5
T_Kd	1.047	T_Kgrow	1.047
Vsd	0.01	SOD	2
T_Vsd	1.024	SedNo3	0.15
Knorg	0.6	SedPinorg	0.02
T_Knorg	1.047	SedNh4	0.02
VsNorg	0.01	Kd1_2	0.5
T_VsNorg	1.024	Kn1_2	0.5
Kn	0.04	Knf1_2	0.03
T_Kn	1.083	Kp1_2	0.02
Kdesnit	2.4	kdn1_2	0.5
T_Kdesnit	1.045	Ra	4.57
Kdeath	0.2	Roresp	100
T_Kdeath	1.047	Rocrec	130
Vsfito	0.003	rna	15
T_Vsfito	1.024	rpa	1
Kfosforg	0.01	FnAN	0.8
T_Kfosforg	1.047	Fp	0.5
VsFosforg	0.06	KcompAd	0.00003
T_VsFosforg	1.024	KresP	45
Isat	200	V_sed_SS	1.6
Kb	0.42	V_sed_Si	0.01
Katenp	0.01		

5.3.2.3. Concentraciones

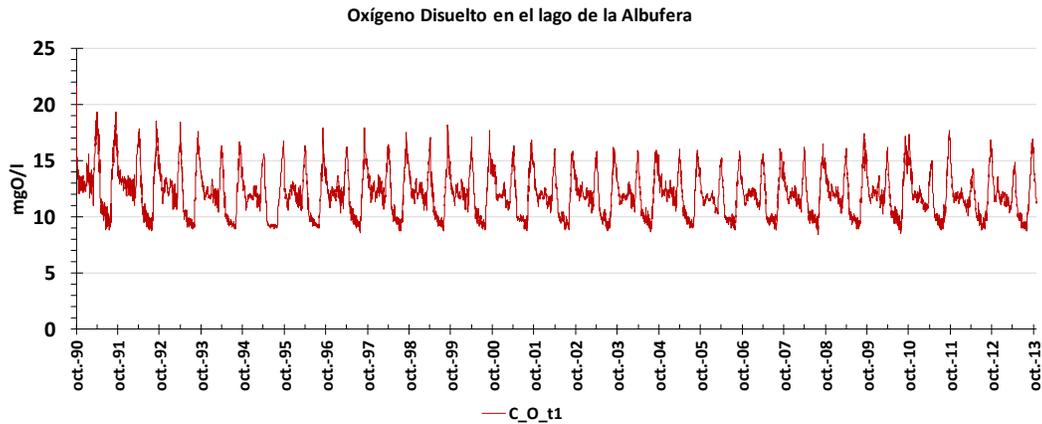
Se muestran las concentraciones para los principales nutrientes calculados.

Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto es un buen indicador del estado global de la masa de agua. La presencia de oxígeno es imprescindible para el desarrollo de la vida



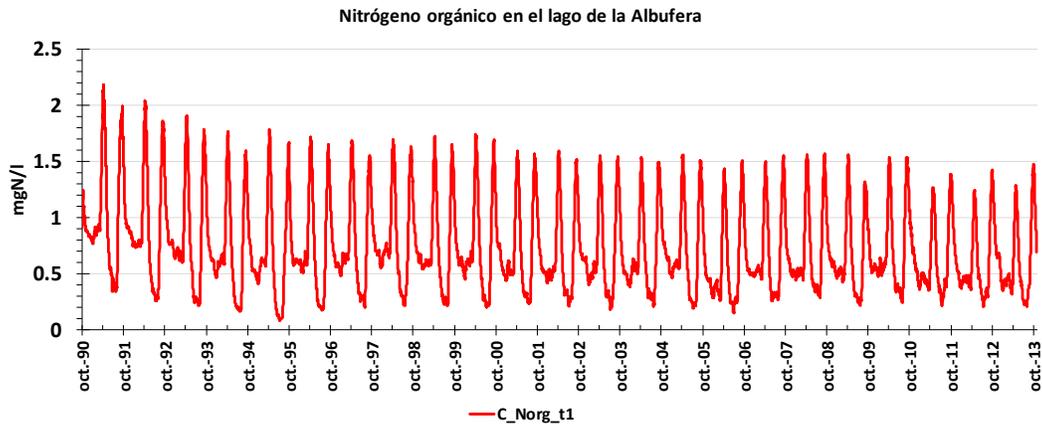
acuática.



Gráfica 5-5. Concentraciones de Oxígeno Disuelto en el lago de la Albufera.

Nitrógeno orgánico

En un sistema hipereutrófico, las concentraciones de nitrógeno orgánico en gran parte suelen deberse al nitrógeno encapsulado en forma de fitoplancton.



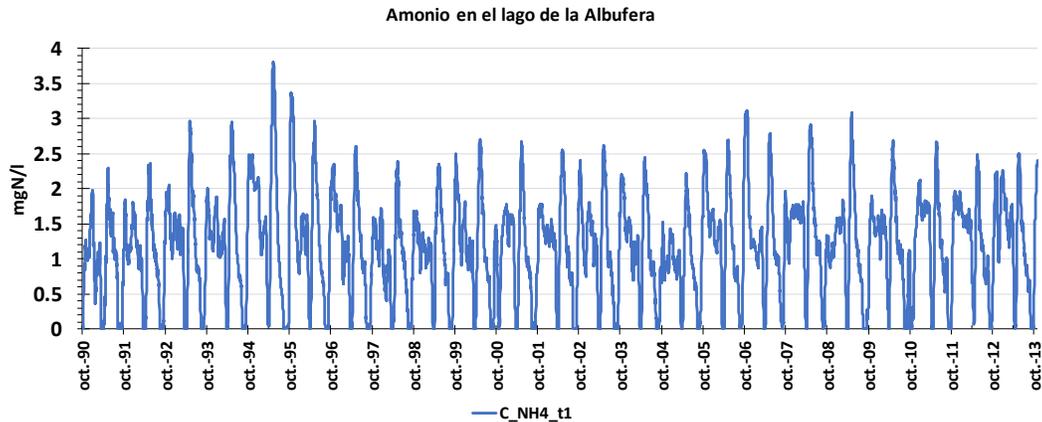
Gráfica 5-6. Concentraciones de Nitógeno Orgánico en el lago de la Albufera.

Amonio

El amonio procedente del proceso de amonificación o mineralización del nitrógeno orgánico contribuye como nutriente en el crecimiento del fitoplancton. A pesar que en este sistema el nitrógeno no es el nutriente



limitante, las concentraciones de amonio son bajas por la alta actividad fitoplanctónica.

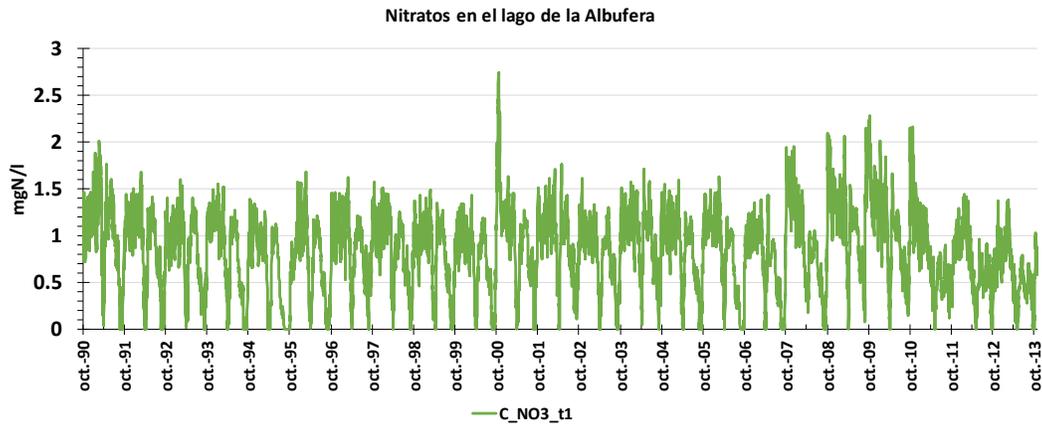


Gráfica 5-7. Concentraciones de Amonio en el lago de la Albufera.

Nitratos

El amonio del agua se oxida de forma natural a nitritos, NO_2 , y éstos pasan rápidamente a nitratos (NO_3), este es el proceso conocido como nitrificación. En el modelo no se calculan los nitritos y se considera que la nitrificación genera directamente nitratos.

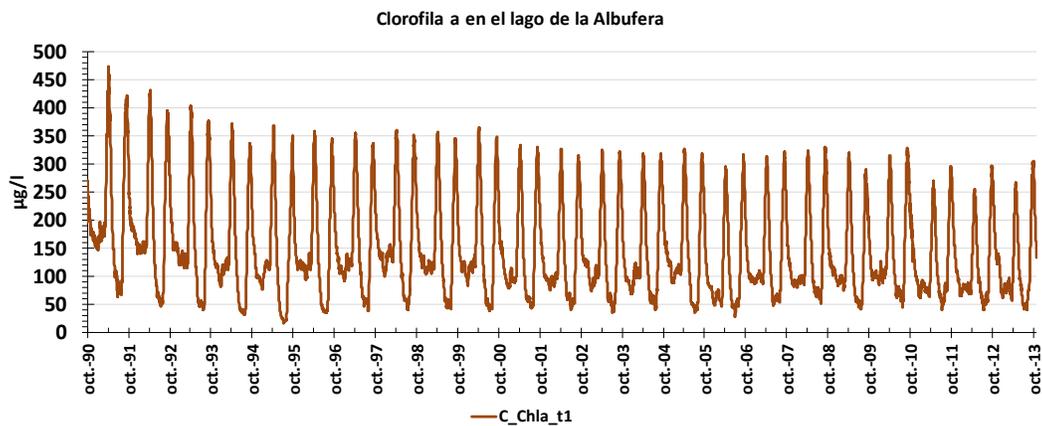
Este nutriente es asimilado fácilmente por plantas y fitoplancton. Por esta razón las concentraciones de nitratos en sistemas eutrofizados suelen ser bajas.



Gráfica 5-8. Serie de entradas de concentraciones de Nitratos.

Clorofila a

La estimación de la concentración de la clorofila *a* es considerada como un indicador robusto del fitoplancton. Por su parte, la concentración de clorofila *a* se utiliza para estimar en forma indirecta la biomasa de las comunidades fitoplanctónicas ya que es el principal pigmento fotosintético presente en los diferentes grupos de algas, también es un indicador del estado fisiológico del fitoplancton y del estado trófico de los sistemas acuáticos.

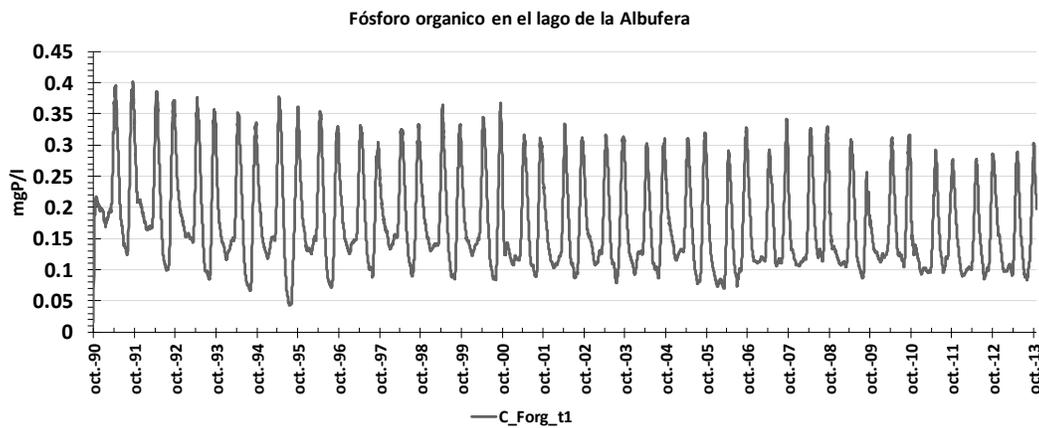


Gráfica 5-9. Concentraciones de Clorofila a en el lago de la Albufera.



Fósforo orgánico

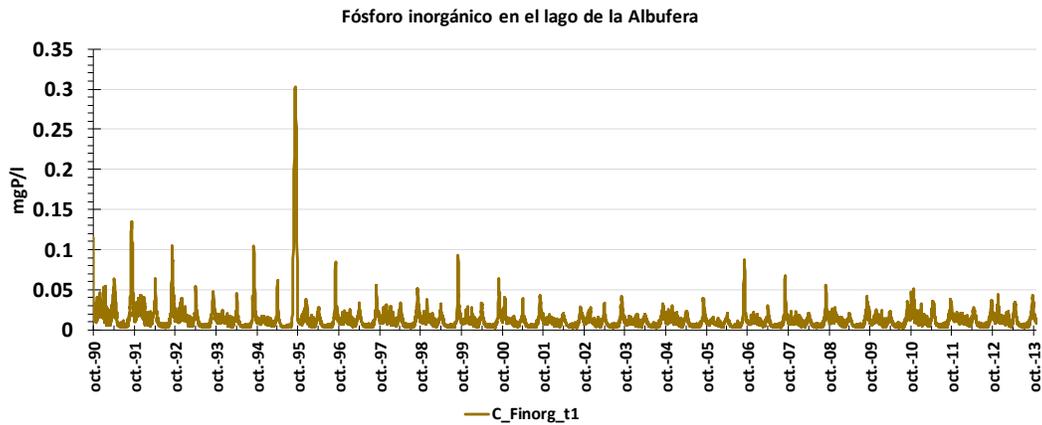
El fósforo es un nutriente indispensable para la vida de algas, plantas y organismos superiores de la cadena trófica. Sin embargo, en condiciones naturales es un elemento escaso en medios acuáticos, ya que no existe como gas. En el caso de sistemas eutrofizados gran parte del fosforo orgánico se encuentra encapsulado con el fitoplancton.



Gráfica 5-10. Concentraciones de Fósforo Orgánico en el lago de la Albufera.

Fósforo inorgánico

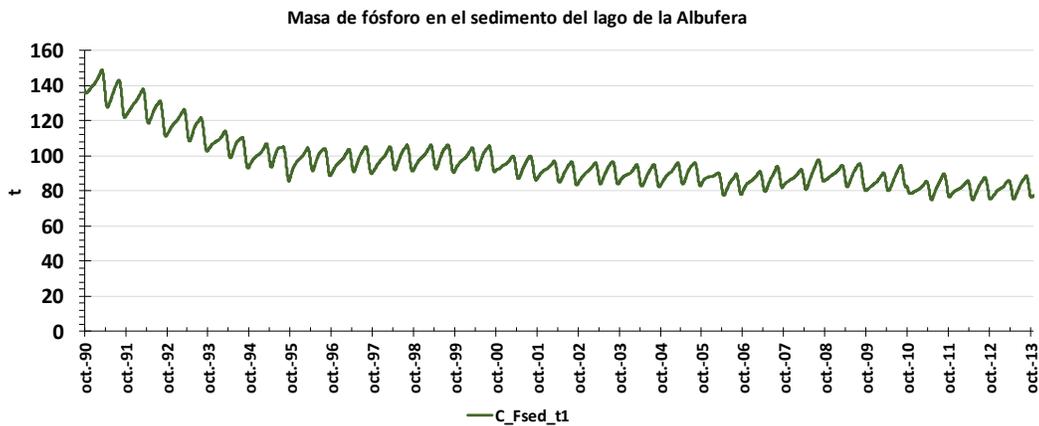
El fósforo inorgánico es la fracción que directamente contribuye al crecimiento del fitoplancton y que limita de forma global sus altos incrementos. Al ser el nutriente limitante, sus concentraciones son muy bajas o inferiores a los umbrales de detección. Esto se debe a que conforme se genera es consumido rápidamente por el fitoplancton.



Gráfica 5-11. Concentraciones de Fósforo Inorgánico en el lago de la Albufera.

5.3.3.Sedimentos

Una de los procesos importantes en el funcionamiento de este modelo ha sido la introducción de los términos correspondientes a la influencia de los sedimentos. En un principio se realizaron múltiples simulaciones sin tener en cuenta la influencia de los sedimentos en el lago y se descubrió que los resultados que se obtenían eran muy negativos. Sin la presencia de los sedimentos el balance obtenido en el modelo no conseguía representar en las simulaciones, los valores observados en la realidad.



Gráfica 5-12. Masa de fósforo en el sedimento del lago de la Albufera



5.4. Tancat de Milia

El *tancat* de Milia es un antiguo arrozal ubicado en la orilla Sur del lago de La Albufera, en el término municipal de Sollana. La palabra *tancat* proviene de la lengua valenciana y significa una zona cerrada o aislada del resto. Un *tancat* es una superficie de cultivo, en este caso de arroz, cerrada por una mota perimetral y que dispone de un motor para la extracción y/o entrada de agua.

El actual *tancat* de Milia cuenta con una superficie de 334.000 m² dedicadas a la implantación de un sistema de HA para reutilizar los efluentes de la depuradora de Albufera Sur y depurar las aguas del lago de La Albufera.

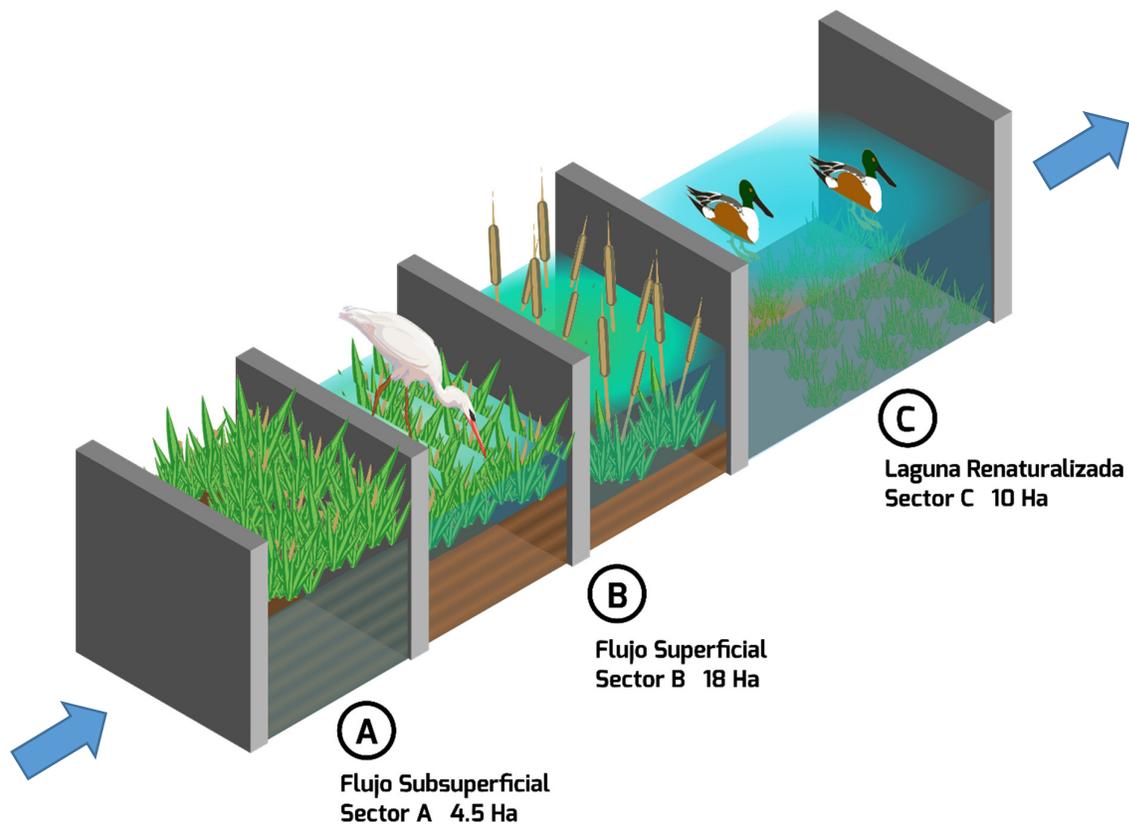


Ilustración 5-12. Funcionamiento del humedal artificial en el tancat de Milia (LIFE_ALBUFERA, 2013).

Los objetivos de mejora de la calidad del agua de generales del filtro verde del *tancat* de Milia son:



- Reducir las concentraciones de contaminantes a La Albufera, mejorando la calidad de las zonas del lago próximas al *tancat*.
- Favorecer el desarrollo de praderas de vegetación sub-acuática. Este tipo de comunidades vegetales dominaban en el lago antes de que sus aguas se empobrecieran.
- Crear un reservorio natural de semillas de vegetación autóctona.
- Crear puntos permanentes de agua, no sujetos a la estacionalidad del arrozal.
- Crear diferentes ambientes de reserva para la flora y la fauna.
- Difundir este tipo de sistema innovador e integrado en el medio natural, con visitas de público especializado y proyectos de divulgación.

El HA se divide en tres sectores, que se describen en los tres siguientes apartados, Sector A: Humedal subsuperficial, Sector B: Humedal superficial y Sector C: Laguna. Los puntos de muestreo del *tancat* y la sectorización se muestra en la Ilustración 5-13:

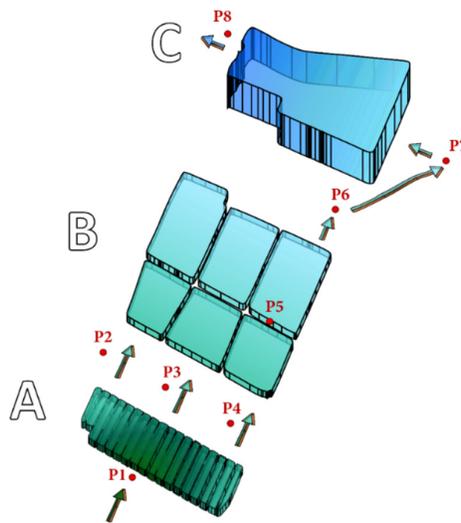


Ilustración 5-13. Puntos de muestreo en el *tancat* de Milia, diferenciando los tres sectores.



5.4.1. Sector A: Humedal subsuperficial

Consiste en un sistema de flujo subsuperficial para la eliminación de fitoplancton y sólidos suspendidos. Da al agua una transparencia que continúa durante las siguientes fases del tratamiento. El agua discurre por el interior de un lecho de gravas en el que se encuentran enraizadas plantas macrófitas. La superficie de este sector abarca unas 4.5 ha.

La composición de este sector consta, desde abajo hasta arriba, de:

- Una capa de arcillas para favorecer la impermeabilización.
- Una lámina de geotextil, para impedir la mezcla con el nivel freático
- Un lecho de gravas de 50cm de espesor por donde discurre el agua y enraízan las plantas.
- Una lámina de geotextil para impedir la colmatación de las gravas.
- Una capa de tierra vegetal de 10cm de espesor.

La vegetación integrante de este sector es el Carrizo (*Phragmites australis*) y la Enea (*Typha latifolia*) en un 50% de ocupación.

5.4.2. Sector B: Humedal superficial

En la parte central del *tancat*, se ubica un humedal artificial basado en flujo superficial, existiendo por ello una lámina visible de agua en una superficie de 18 ha. En este tipo de humedales, la capa más superficial es aeróbica, mientras que las más profundas se producen estados anaeróbicos. Estas condiciones proporcionan un medio muy eficaz para la eliminación del nitrógeno, elementos que en una elevada concentración provocan el empobrecimiento de las aguas.

La vegetación integrante del humedal es la misma en cuanto a las especies y porcentajes de ocupación que en el sector A.



5.4.3. Sector C: Laguna

El objetivo de este tercer sector es múltiple: por un lado, se busca el tratamiento final de las aguas procedentes del Sector B, a la vez que se favorece la integración global del *tancat* como filtro verde en el ambiente en el que se enmarca.

Por otra parte, se emplea para potenciar el desarrollo de vegetación subacuática. Estas comunidades eran típicas en las zonas lacustres con buena calidad de agua, que se encontraban en los años 60 en el PNAV. Esta laguna ocupa 10 ha de las cuales 7,3 ha son de lámina libre de agua interior y 2,7 ha pertenecen a dos islas destinadas a la nidificación y descanso de las aves.

5.4.4. Datos de entrada

La información utilizada para el desarrollo del modelo ha sido obtenida gracias al gran esfuerzo de las diferentes Acciones pertenecientes al Proyecto Europeo LIFE Albufera (LIFE Albufera, 2013). En este apartado se exponen los documentos consultados, además se puede acceder a ellos mediante un vínculo en cada título.

Por una parte, los datos referentes a la hidráulica del *tancat* de Milia han sido recopilados y estimados por la Acción B1 encargada de la gestión y monitorización de la hidráulica. El documento con título "[Informe del primer año de resultados de gestión de la hidráulica](#)" en el que se recopila tal información, es accesible desde la página web del LIFE Albufera.

Por otra parte, las concentraciones en el *tancat* para la alimentación y calibración del modelo se han obtenido de la Acción C1 encargada de la monitorización de la calidad del agua. Se puede consultar en la página web, el documento con título "[Informe del primer año de resultados de la monitorización del impacto de la gestión sobre la calidad del agua y sedimentos](#)" que recoge los trabajos realizados por la Acción. En el {ANEJO E} se pueden observar las concentraciones de cada uno de los constituyentes



modelados y los perfiles dentro del *tancat*. Para la caracterización del fitoplancton y poder diferenciar las diatomeas entre el resto de especies fitoplanctónicas se han consultado el documento "[Trabajos de control de las variables biológicas para evaluar la eficiencia de los sistemas de humedales artificiales en el P.N. Albufera de Valencia](#)", también accesible desde la web.

Los datos de partida del modelo son los caudales y concentraciones del primer punto de muestro (P1) del *tancat*. Para evitar que los resultados se vean afectados por las condiciones iniciales impuestas en el modelo, se decide alargar la serie tres meses. De este modo, anteriores al inicio de datos muestreados, se disponen de tres meses de calentamiento, siendo el periodo de simulación del 1 de octubre de 2013 al 31 de diciembre de 2015.

Se han obtenido series diarias a partir de los muestreos en el punto de entrada al *tancat*, estas se han generado a partir de los valores interpolados y un pequeño coeficiente aleatorio. De este modo se pueden obtener numerosas series de entrada y comprobar la influencia de la incertidumbre en las series de entrada. También se puede aplicar el uso de la optimización estocástica permitiendo incluir el efecto de la incertidumbre en las aportaciones.

5.4.5. *Resultados y calibración*

En este caso concreto se ha realizado una primera calibración automática para estimar grosso modo los parámetros del modelo. Esta calibración se ha realizado para el sector A y en el resto se ha procedido con una calibración manual. Se ha calibrado teniendo en cuenta los puntos P4, P6 y P8. Siendo estos los muestreos característicos de los caudales de salida de cada sector.

Se puede observar en la Ilustración 5-14 un esquema de la sectorización realizada para la modelización y calibración del *tancat*. Los resultados del sector anterior sirven de entradas para el sector siguiente.

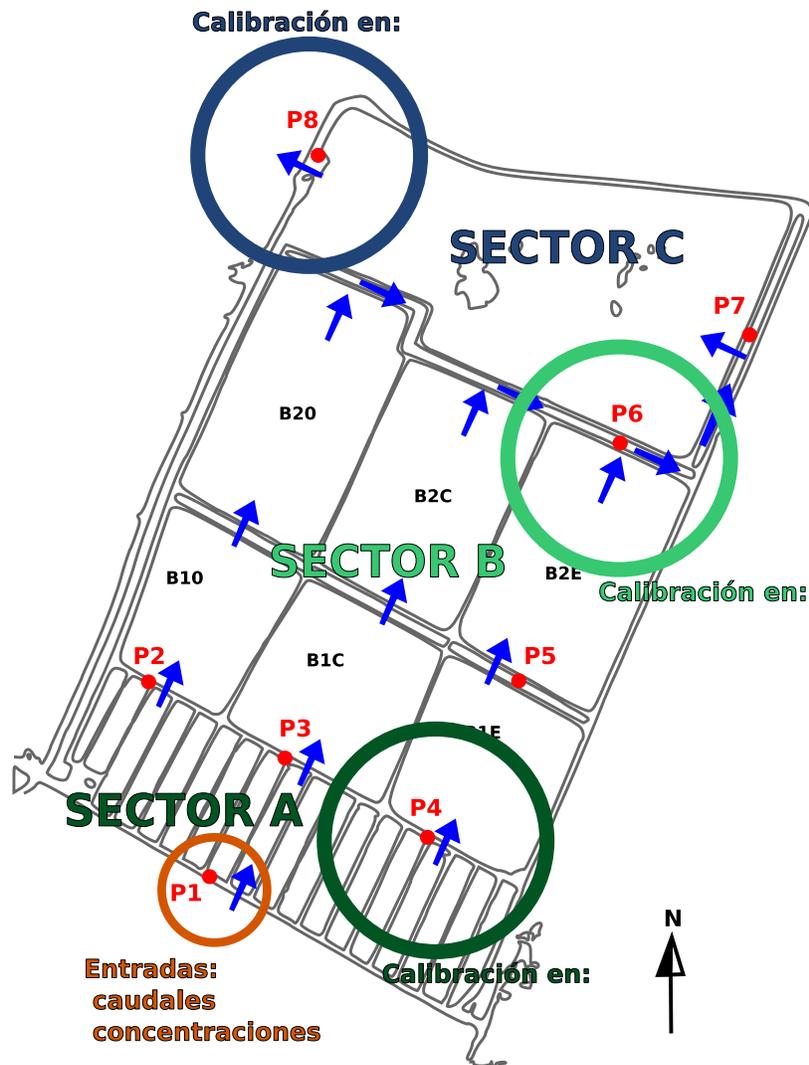


Ilustración 5-14. Puntos de calibración en el tancat de Milia.

Este tipo de modelos calibrados de predicción de clorofila *a* son útiles para calcular la capacidad de restauración de determinadas acciones asociados a una reducción de nutrientes o a la variación de los flujos de entrada (Onandia et al., 2015, 2014).

5.4.5.1. Hidráulica

La caracterización hidráulica del modelo se representa en la Ilustración 5-15. Los caudales de entrada son discontinuos ya que se bombea entre semana y el fin de semana se para. Al tratarse de un modelo de simulación diaria no se representan variaciones horarias en el bombeo de caudales. En el primer



tanque se tiene en cuenta unas pérdidas de caudales de entrada del 10% debido a sobresaturación y desbordamiento. En cambio, no se considera evaporación ya que se trata de un sistema subsuperficial aislado de la radiación solar.

El resto de sectores tienen un efecto de laminación que consigue unos caudales más continuos entre el sector B y el C.

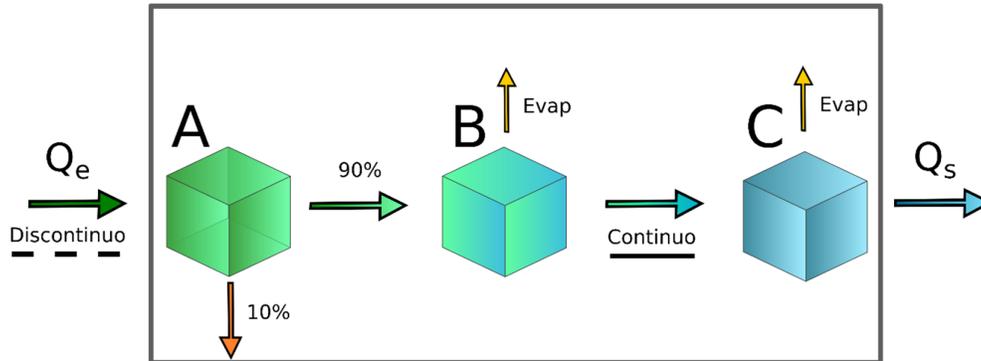


Ilustración 5-15. Modelo conceptual del balance hidráulico en el tancat de Milia.

Los caudales de salida de cada tanque sirven como los caudales de entrada del siguiente. Además, las concentraciones calculadas en cada tanque son los valores de entrada para el siguiente sector. De esta manera se consigue un sistema independiente capaz de predecir los caudales y concentraciones de salida del humedal. Los puntos de muestreo intermedios del sistema sirven para la calibración y comprobar el correcto funcionamiento del sistema.

5.4.5.2. Constantes

Las constantes calibradas de los tres sectores se muestran en Tabla 5-2. El significado y descripción de cada constante se describe en la metodología en la Tabla 4-1.



Tabla 5-2. Constantes calibradas en el tancat de Milia.

Constantes	SECTOR A	SECTOR B	SECTOR C	Unidad	Constantes	SECTOR A	SECTOR B	SECTOR C	Unidad
Ka	0	3.5	3.5	1/d	Kfosfa	0.3	0.001	0.001	1/d
T_Ka	1.024	1.024	1.024	-	T_Kfosfa	1.024	1.024	1.024	-
Kd	0.09	0	0	1/d	Kgrow	0	5	5	1/d
T_Kd	1.047	1.047	1.047	-	T_Kgrow	1.047	1.047	1.047	-
Vsd	0.1	0	0	m/d	SOD	-0.01	-2	-2	g/m2/d
T_Vsd	1.024	1.024	1.024	-	SedNo3	-0.15	-0.04	0.5	g/m2/d
Knorg	0.02	0.1	0.1	1/d	SedPinorg	0	0.02	0.07	g/m2/d
T_Knorg	1.047	1.047	1.047	-	SedNh4	0	0.02	0.01	g/m2/d
VsNorg	0.12	0.001	0.001	m/d	Kd1_2	0.5	0.5	0.5	mgO
T_VsNorg	1.024	1.024	1.024	-	Kn1_2	0.5	0.5	0.5	mgO
Kn	0.5	1	1	1/d	Knf1_2	0.03	0.03	0.03	mgN
T_Kn	1.083	1.083	1.083	-	Kp1_2	0.02	0.02	0.02	mgP
Kdesnit	0.1	0.1	0.1	1/d	kdn1_2	0.5	0.5	0.5	mgO
T_Kdesnit	1.045	1.045	1.045	-	Ra	4.57	4.57	4.57	mgO/mgN
Kdeath	0.1	0.25	0.25	1/d	Roresp	100	100	100	mgO/mgChla
T_Kdeath	1.047	1.047	1.047	-	Rocrec	130	130	130	mgO/mgChla
Vsfito	0.2	0.01	0.01	m/d	rna	15	15	15	mgN/mgChla
T_Vsfito	1.024	1.024	1.024	-	rpa	1	1	1	mgP/mgChla
Kfosforg	0.01	0.01	0.01	1/d	FnAN	0.8	0.8	0.8	%
T_Kfosforg	1.047	1.047	1.047	-	Fp	0.5	0.5	0.5	%
VsFosforg	0.12	0.015	0.015	m/d	KcompAd	0	0.00001	0.00001	1/tnP
T_VsFosforg	1.024	1.024	1.024	-	KresP	10	10	10	tnP
lsat	200	150	150	langleys	V_sed_SS	2.5	0	0	m/d
Kb	0.42	0.42	0.42	1/m	VsedSi	0.01	0.1	0.1	m/d
Katenp	0.01	0.01	0.01	l/(mg-m)					

Las constantes permanecen estables y con pequeños cambios de unos sectores a otros. En el sector A las constantes tienen valores mayores en los procesos de sedimentación ya que de esta forma la herramienta es capaz de reproducir el efecto "filtro" que se produce en este humedal subsuperficial. Además, también se tiene en cuenta que la reaireación es nula y que el crecimiento del fitoplancton se paraliza por limitación del factor lumínico.

Tanto el sector B como el C presentan valores parecidos al ser sistemas superficiales similares. Una de las diferencias más notables es la constante de reaireación que en el sector B es más alta por ser un sistema menos profundo, y que en la laguna este proceso tiene menor peso en la ecuación de balance del oxígeno disuelto.

5.4.5.3. Concentraciones

A partir de la información se ha comprobado una reducción de todos los nutrientes de entrada al humedal y en determinados momentos se observan



rendimientos superiores al 80%. Se comprueba el correcto funcionamiento del humedal, comparado con otros estudios en los que las eficiencias de reducción eran superiores al 75%, y en el caso del fósforo las concentraciones de salida estaban entre los $0.1 \text{ mgP}\cdot\text{l}^{-1}$ a $0.2 \text{ mgP}\cdot\text{l}^{-1}$ (Martín et al., 2013a).

También se ha comprobado que conforme mayores son las concentraciones de entrada mayores son los rendimientos de depuración. Fenómeno observado en diferentes estudios en los que la máxima eliminación de fósforo total se producía con una concentración superior a $0.2 \text{ mgP}\cdot\text{l}^{-1}$, con un rendimiento medio de 54.5% (Martín et al., 2013a). A pesar que en algunos estudios se consiguieran reducciones de nitrógeno total del orden del 90% (Zhou et al., 2009), en este caso las concentraciones de nitrógeno total son inferiores, entorno al 60%.

A continuación, se muestran las concentraciones de los nutrientes modelados para cada uno de los sectores. Destacar que los errores se van acumulando ya que los resultados de un sector sirven de series de entrada para el siguiente.

Los resultados de la simulación se han comparado con los puntos P4, P6 y P8 como se muestra en la Ilustración 5-14. También se muestran las concentraciones de entrada al modelo caracterizado con los muestreos realizados en el punto P1. Se observa de forma general que para el primer sector se obtienen buenas calibraciones y el modelo para esta primera parte se comporta acorde con la realidad. En el caso del sector B los resultados no son muy positivos, aunque se consigue representar de forma promedia la mayoría de nutrientes. Finalmente, en el sector C las concentraciones se mantienen más constantes y los cambios son menos pronunciados. La dificultad de ajuste de esta parte del *tancat* se debe a que es un sistema más heterogéneo y por tanto la incertidumbre en él es mayor. Además, posiblemente se produzcan situaciones puntuales que no se han modelado y necesiten de más estudios para una correcta caracterización.



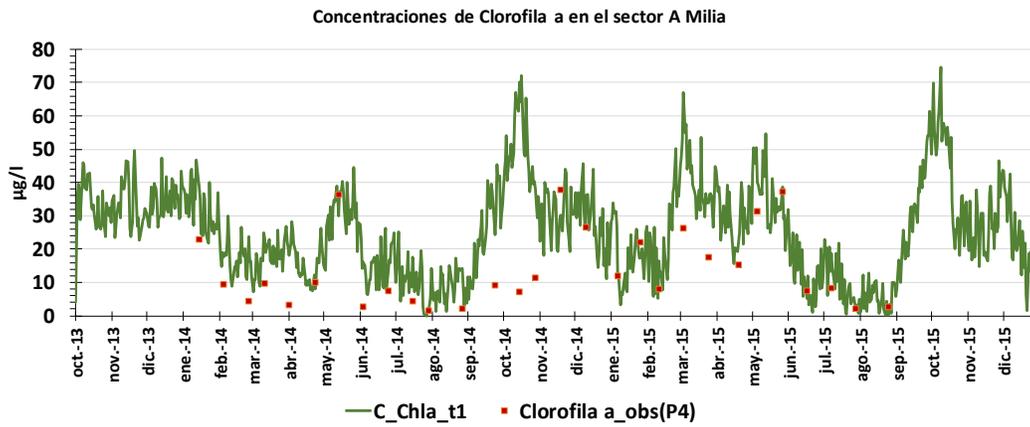
Finalmente, los resultados en la laguna tienen un buen ajuste, a pesar de acumular el error de la simulación de los dos sectores anteriores. Mejor es el ajuste en los contaminantes más conservativos y menos variables. En el caso de procesos más complejos más difícil es reproducir completamente lo que ocurre en la realidad.

Además, se puede observar como el humedal consigue homogenizar los valores de la mayor parte de nutrientes, reduciendo al máximo las variaciones internas. En determinadas ocasiones se ve que en las muestras esto no es del todo correcto y en parte se debe a una falta de aportes en el interior del humedal que no se están modelando.

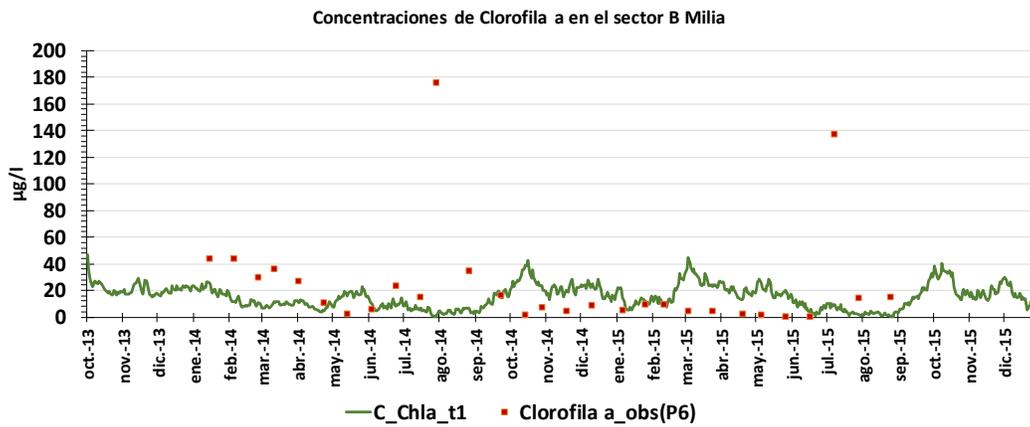
Clorofila *a*

La estimación de la concentración de la clorofila *a* es considerada como un indicador robusto del fitoplancton. Por su parte, la concentración de clorofila *a* se utiliza para estimar en forma indirecta la biomasa de las comunidades fitoplanctónicas ya que es el principal pigmento fotosintético presente en los diferentes grupos de algas, también es un indicador del estado fisiológico del fitoplancton y del estado trófico de los sistemas acuáticos.

Se observa un crecimiento en los meses de primavera (abril - mayo) y un segundo aumento, más elevado, en los meses de otoño (septiembre - octubre). En el sector A (Gráfica 5-13) se produce una reducción significativa de $120 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ a unos $20 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ de valor promedio, suponiendo un rendimiento mayor al 70%. En cambio en el sector B (Gráfica 5-14) se obtienen unas concentraciones mayores ya que se trata de un humedal superficial en el que la limitación solar no es tan restrictiva. Finalmente, en el sector C (Gráfica 5-15) las concentraciones vuelven a descender situándose en valor promedio ligeramente superior a los $20 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$.



Gráfica 5-13. Calibración de Clorofila a en el Sector A del tancat de Milia.



Gráfica 5-14. Calibración de Clorofila a en el Sector B del tancat de Milia.

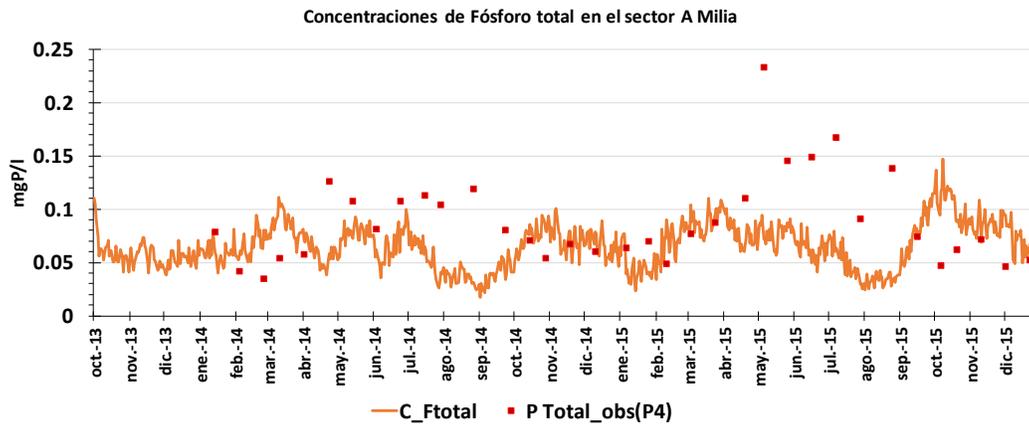


Gráfica 5-15. Calibración de Clorofila a en el Sector C del tancat de Milia.

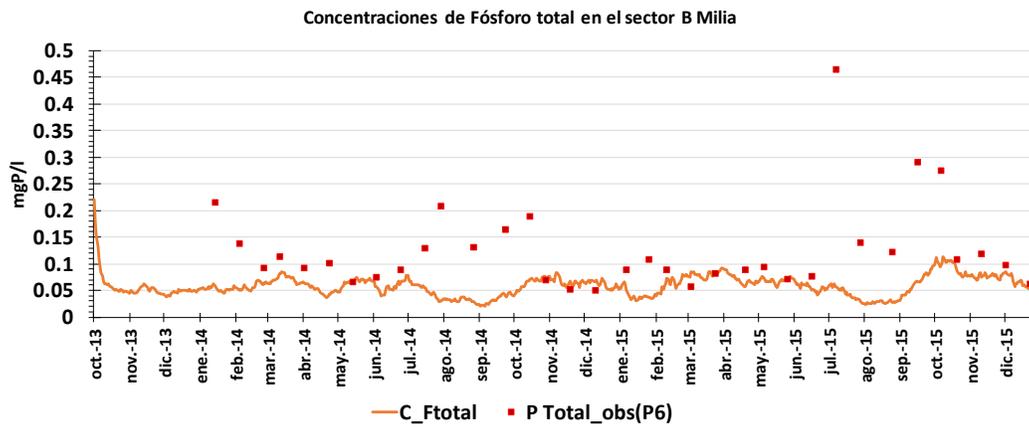


Fósforo total

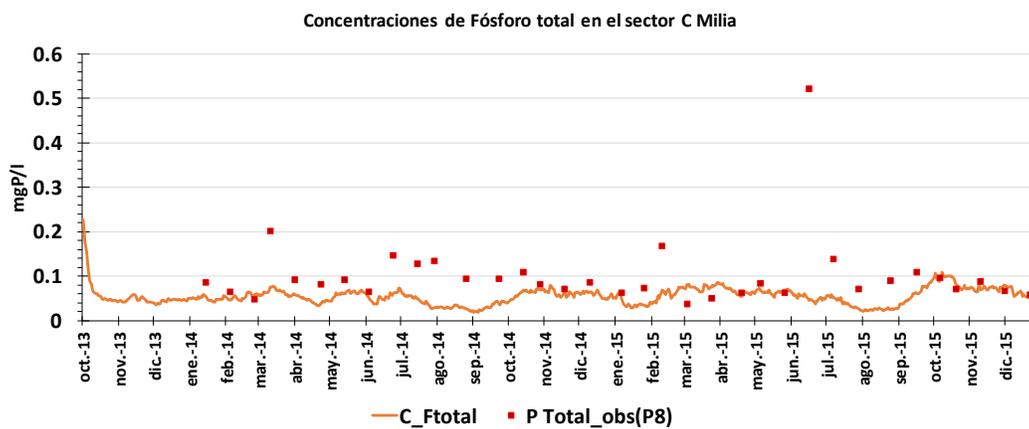
El fósforo es un nutriente indispensable para la vida de algas, plantas y organismos superiores de la cadena trófica. Sin embargo, en condiciones naturales es un elemento escaso en medios acuáticos, ya que no existe como gas. En el caso de sistemas eutrofizados gran parte del fosforo orgánico se encuentra encapsulado con el fitoplancton. El fósforo inorgánico es la fracción que directamente contribuye al crecimiento del fitoplancton y que limita de forma global sus altos incrementos. Al ser el nutriente limitante, sus concentraciones son muy bajas o inferiores a los umbrales de detección. Esto se debe a que conforme se genera es consumido rápidamente por el fitoplancton.



Gráfica 5-16. Calibración de Fósforo total en el Sector A del tanca de Milia.



Gráfica 5-17. Calibración de Fósforo total en el Sector B del tanca de Milia.



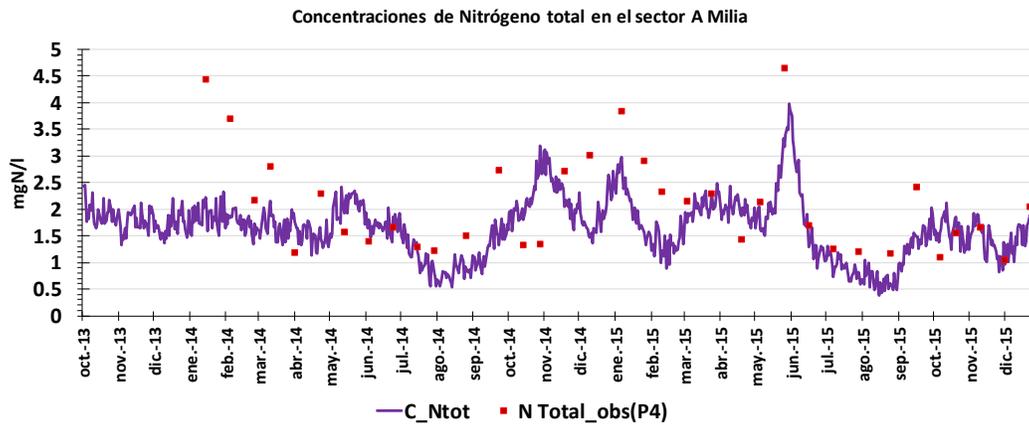
Gráfica 5-18. Calibración de Fósforo total en el Sector C del tanca de Milia.



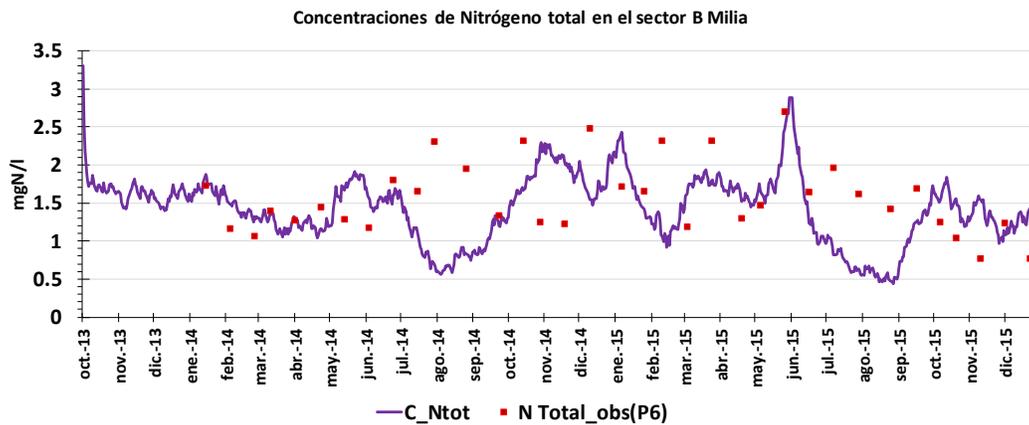
Nitrógeno total

En un sistema hipereutrófico, las concentraciones de nitrógeno orgánico en gran parte suelen deberse al nitrógeno encapsulado en forma de fitoplancton.

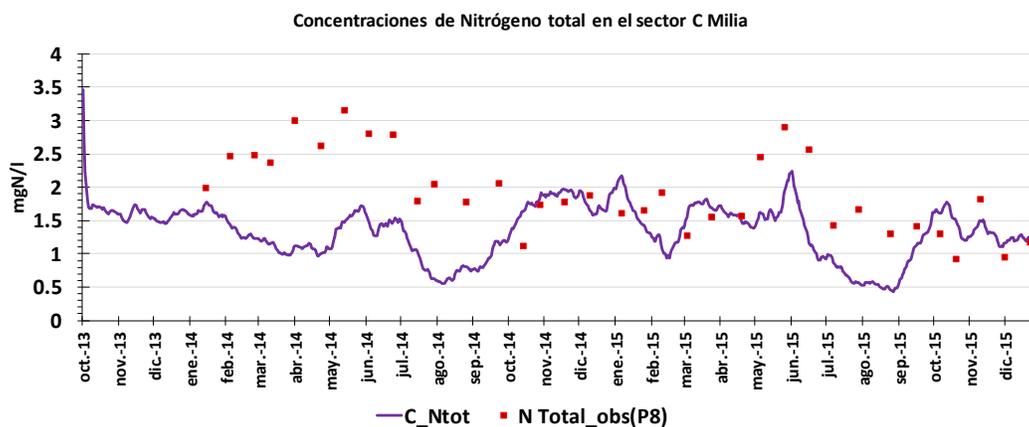
Los valores de entrada no son excesivamente elevados y todos ellos quedan por debajo de los $4 \text{ mgN}\cdot\text{l}^{-1}$. El comportamiento del nitrógeno orgánico tiene un comportamiento parecido al de la DQO. En el sector A se produce una reducción importante superior al 50% como se observa en la Gráfica 5-19. En cambio, en el sector B se observa un aumento generalizado de las concentraciones (Gráfica 5-20). Posiblemente, como se ha comentado anteriormente, se deba a alguna entrada de materia orgánica no controlada. A pesar de esta situación, las concentraciones quedan acotados superiormente en los $2 \text{ mgN}\cdot\text{l}^{-1}$, siendo siempre inferiores a los de entrada del humedal. Finalmente en el sector C (Gráfica 5-21) se produce un ligero descenso debido a amonificación y a la reducción de las concentraciones de clorofila *a*.



Gráfica 5-19. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector A del tancat de Milia.



Gráfica 5-20. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector B.



Gráfica 5-21. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector C.

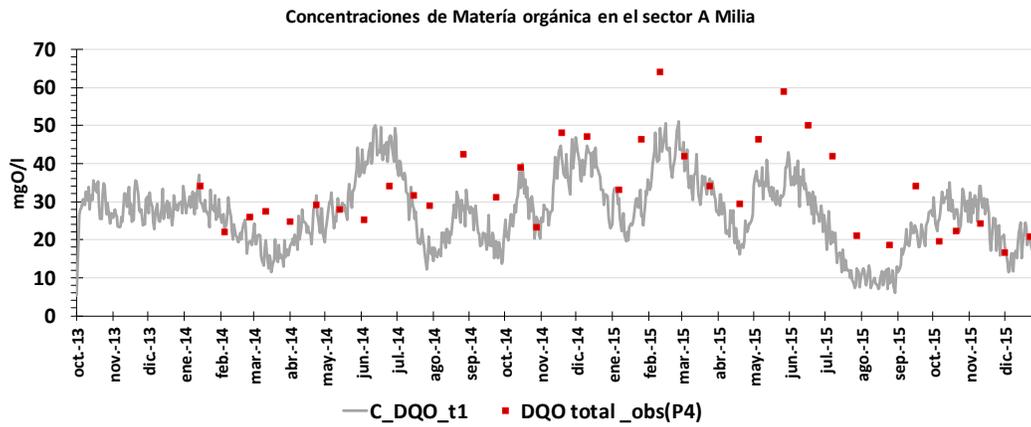
Materia orgánica



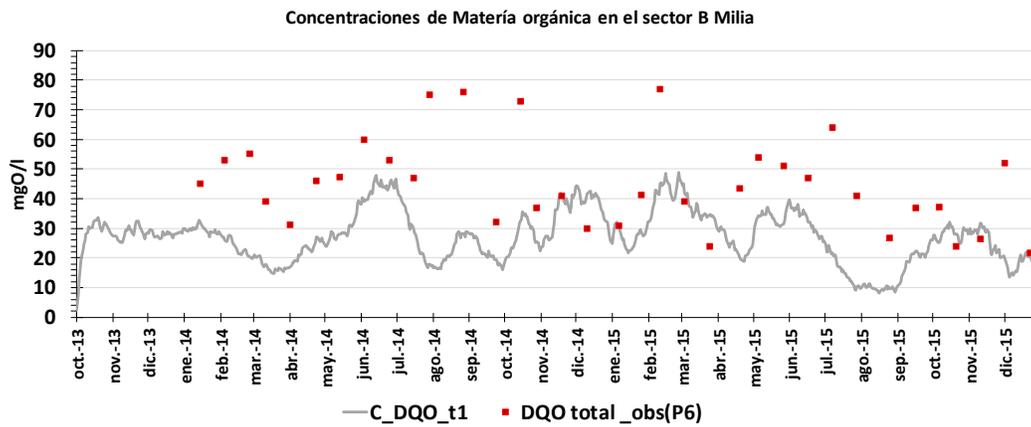
La presencia de materia orgánica y oxígeno disuelto en el lago está muy afectada por el estado hipertrófico. De hecho, presumiblemente gran parte de la materia orgánica suspendida del lago procede del propio fitoplancton.

No se disponen datos de DBO_5 ya que esta prueba se ve modificada por la actividad fitoplanctónica y por tanto se decide estimar la degradación de la materia orgánica con los valores de la demanda química de oxígeno.

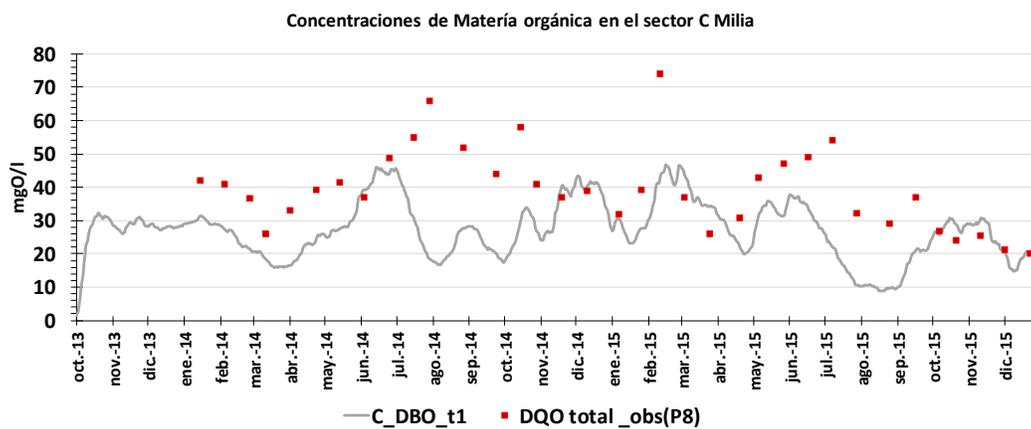
Parece que a lo largo del humedal se mantienen concentraciones estables sin grandes variaciones. Se puede comprobar que el rendimiento en este contaminante en ocasiones supera el 60%, demostrando su eficiencia para reducir la materia orgánica. A lo largo de los tres sectores, Gráfica 5-22, Gráfica 5-23 y Gráfica 5-24 las concentraciones quedan acotadas entre los $20 \text{ mgO}_2 \cdot \text{l}^{-1}$ hasta los $60 \text{ mgO}_2 \cdot \text{l}^{-1}$. Cabe destacar que en el sector B se produce un aumento de concentraciones, posiblemente debido a un aporte externo, que en el modelo no se contempla. Para mejorar el ajuste sería recomendable la detección y cuantificación de las entradas de materia orgánica.



Gráfica 5-22. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector A en el tancat de Milia.



Gráfica 5-23. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector B del tancat de Milia.



Gráfica 5-24. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector C del tancat de Milia.

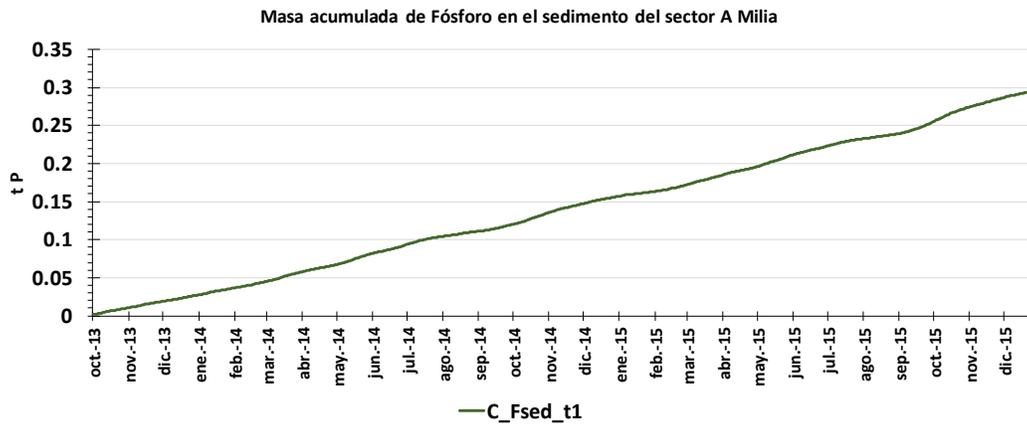


5.4.6. Sedimentos

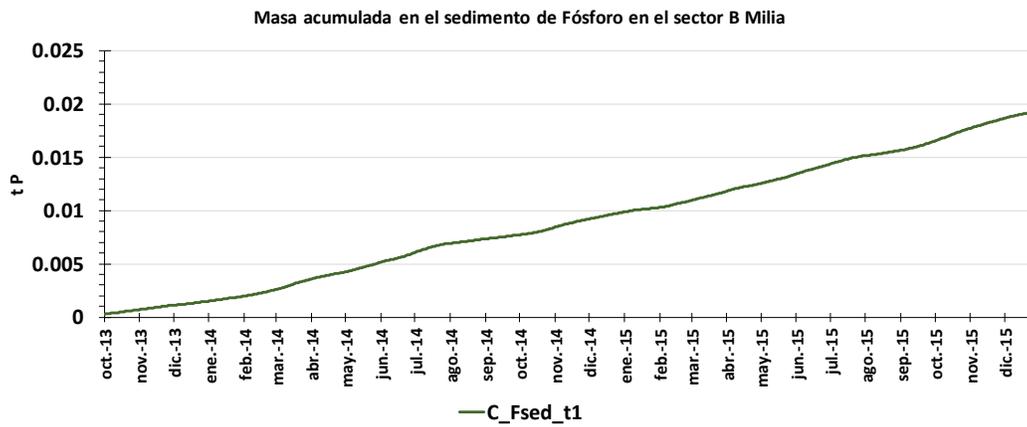
En este tipo de sistemas la interacción del sedimento con la columna de agua es muy importante. Se puede observar en el diagrama de procesos modelados por la herramienta (Ilustración 4-3) que la mayoría de nutrientes tienen relación con el sedimento, ya sea como fuente o sumidero de materia.

La correcta caracterización de los sedimentos suele ser determinante en la mayoría de modelos de este tipo de ecosistemas acuáticos. Determinar correctamente los niveles de fondo de metales en los sedimentos es un paso significativo hacia una correcta evaluación del grado de contaminación (Hernández-Crespo and Martín, 2015). Por tanto, caracterizar las interacciones de los sedimentos es muy importante para proponer las medidas adecuadas para la recuperación de su estado ecológico.

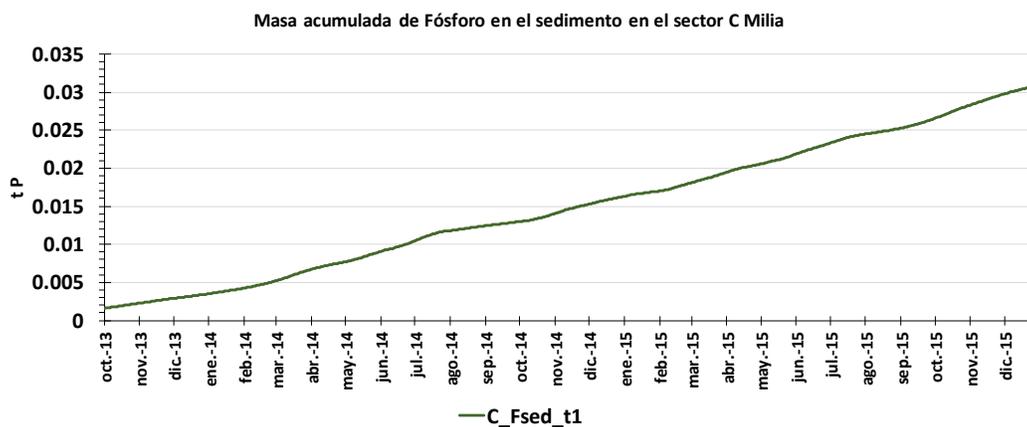
La resuspensión de fósforo desde el sedimento ha sido observada en determinados estudios (Martín et al., 2013a) en los que, si las concentraciones de entrada al humedal artificial eran bajas, se producía un efluente más concentrado. También se ha comprobado que la resuspensión de nutrientes en el lago de La Albufera supone un gran aporte de materia (del Barrio Fernández et al., 2012). La sedimentación por coprecipitación de fósforo inorgánico, puede mantener bajas concentraciones de fósforo soluble en la columna de agua (Rodrigo et al., 2015). Pero puede desencadenar en una lenta recuperación de los sistemas gravemente afectados por procesos de eutrofización.



Gráfica 5-25. Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector A del tancat de Milia.



Gráfica 5-26. Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector B del tancat de Milia.



Gráfica 5-27 Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector C del tancat de Milia.



5.5. Tancat de Pipa

El Tancat de la Pipa es un Área de Reserva dentro del Parque Natural de La Albufera. Está abierta al público desde Octubre de 2009. El proyecto ha sido impulsado por la confederación Hidrográfica del Júcar, la actual gestora del espacio, con la colaboración de la Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente.

Con una superficie de 40 hectáreas, el Tancat de la Pipa cuenta con dos lagunas, un Ullal y cuatro parcelas que funcionan como humedales artificiales (filtros verdes), que retienen los nutrientes y mejoran la calidad del agua que entra en las lagunas y posteriormente llega a l'Albufera.



Ilustración 5-16. Esquema del tancat de la Pipa.

5.5.1. Datos de entrada

La información utilizada para el desarrollo del modelo ha sido obtenida gracias al gran esfuerzo de las diferentes Acciones pertenecientes al Proyecto Europeo



LIFE Albufera (LIFE Albufera, 2013). En este apartado se exponen los documentos consultados, además se puede acceder a ellos mediante un vínculo en cada título.

Por una parte, los datos referentes a la hidráulica del *tancat* de la Pipa han sido recopilados y estimados por la Acción B1 encargada de la gestión y monitorización de la hidráulica. El documento con título "[Informe del primer año de resultados de gestión de la hidráulica](#)" en el que se recopila tal información, es accesible desde la página web del LIFE Albufera.

Por otra parte, las concentraciones en el *tancat* para la alimentación y calibración del modelo se han obtenido de la Acción C1 encargada de la monitorización de la calidad del agua. Se puede consultar en la página web, el documento con título "[Informe del primer año de resultados de la monitorización del impacto de la gestión sobre la calidad del agua y sedimentos](#)" que recoge los trabajos realizados por la Acción. En el {ANEJO E} se pueden observar las concentraciones de cada uno de los constituyentes modelados y los perfiles dentro del *tancat*. Para la caracterización del fitoplancton y poder diferenciar las diatomeas entre el resto de especies fitoplanctónicas se han consultado el documento "[Trabajos de control de las variables biológicas para evaluar la eficiencia de los sistemas de humedales artificiales en el P.N. Albufera de Valencia](#)", también accesible desde la web.

Los datos de partida del modelo son los caudales y concentraciones del punto de muestro (P3) del *tancat*. Para evitar que los resultados se vean afectados por las condiciones iniciales impuestas en el modelo, se decide alargar la serie tres meses. De este modo, anteriores al inicio de datos muestreados, se disponen de tres meses de calentamiento, siendo el periodo de simulación del 1 de octubre de 2013 al 31 de diciembre de 2015.

Se han obtenido series diarias a partir de los muestreos en el punto de entrada al *tancat*, estas se han generado a partir de los valores interpolados y un pequeño coeficiente aleatorio. De este modo se pueden obtener numerosas



series de entrada y comprobar la influencia de la incertidumbre en las series de entrada. También se puede aplicar el uso de la optimización estocástica permitiendo incluir el efecto de la incertidumbre en las aportaciones.

5.5.2.Resultados y calibración

En este caso concreto se ha realizado una primera calibración automática para estimar grosso modo los parámetros del modelo. Esta calibración se ha realizado para los sectores fp y en el resto del proceso se ha procedido con una calibración manual. Se ha calibrado teniendo en cuenta los puntos P4, P5, P6 y P8. Siendo estos los muestreos característicos de los caudales de salida de cada sector.

Se puede observar en la siguiente ilustración un esquema de la sectorización realizada para la modelización y calibración del *tancat*. Los resultados del sector anterior sirven de entradas para el sector siguiente.

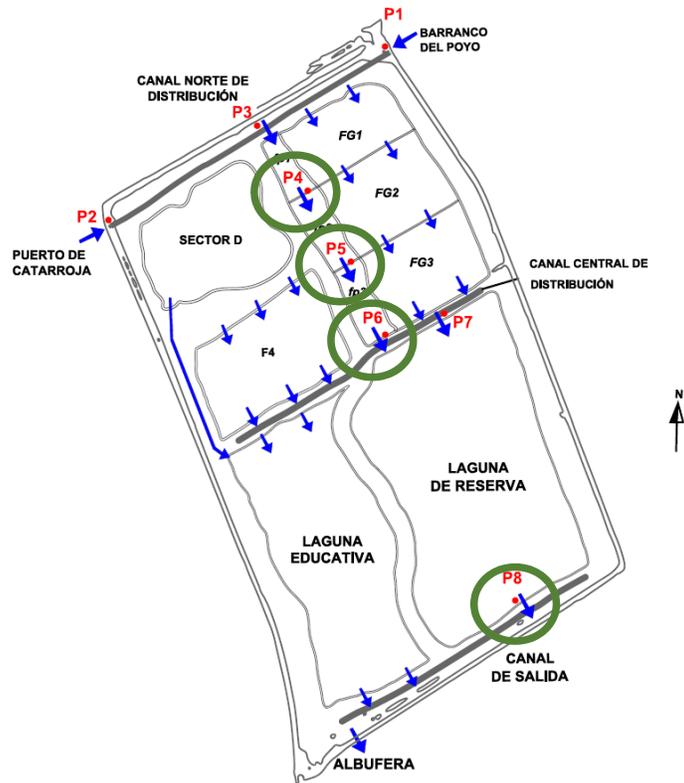


Ilustración 5-17. Puntos de calibración en el tancat de la Pipa.

5.5.2.1. Hidráulica

La caracterización hidráulica del modelo se representa en las siguientes ilustraciones. Los caudales de entrada en los sectores FG están medidos en el punto P3. Para el calculo del balnce en la laguna se ha realizado otro modelo independiente teniendo en cuenta los caudales de P7 como entrada y calibrando para la salida del tancat en P8.

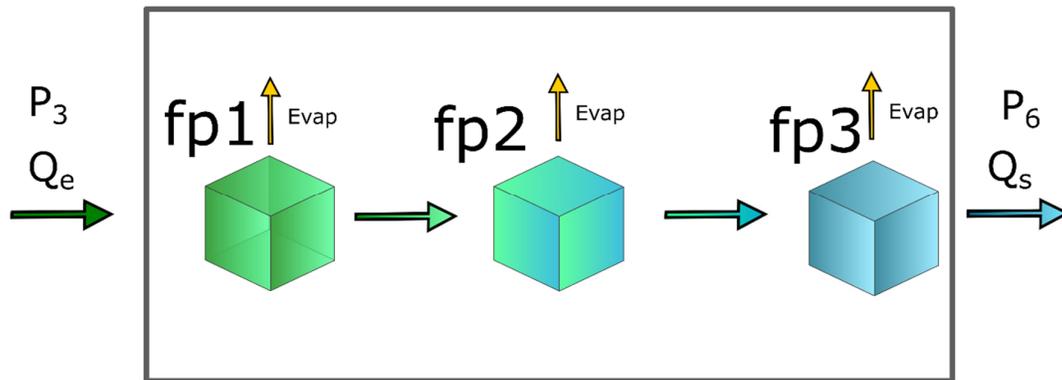


Ilustración 5-18. Modelo conceptual del balance hídrico en los sectores FG del tancat de Pipa.

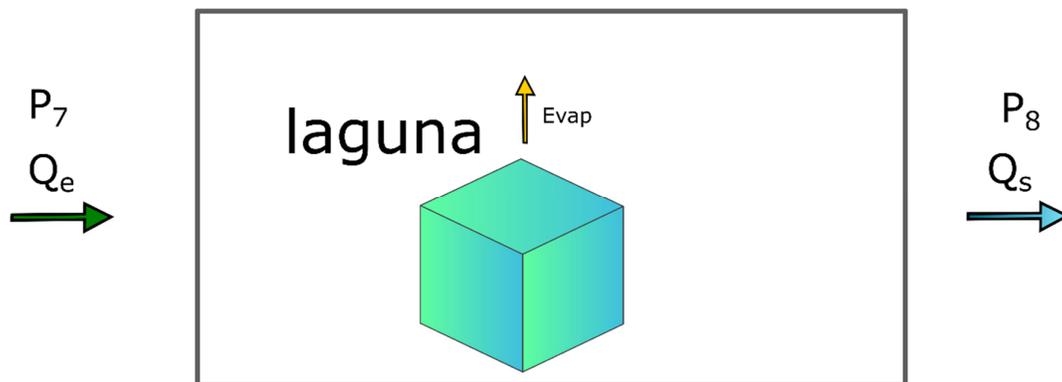


Ilustración 5-19. Modelo conceptual del balance hídrico la laguna del tancat de Pipa.

Los caudales de salida de cada tanque sirven como los caudales de entrada del siguiente. Además, las concentraciones calculadas en cada tanque son los valores de entrada para el siguiente sector. De esta manera se consigue un sistema independiente capaz de predecir los caudales y concentraciones de salida del humedal. Los puntos de muestreo intermedios del sistema sirven para la calibración y comprobar el correcto funcionamiento del sistema.

5.5.2.2. Constantes

Las constantes calibradas de los tres sectores se muestran en la siguiente tabla. El significado y descripción de cada constante se describe en la metodología en la Tabla 4-1.



Tabla 5-3. Constantes calibradas en el tancat de Pipa.

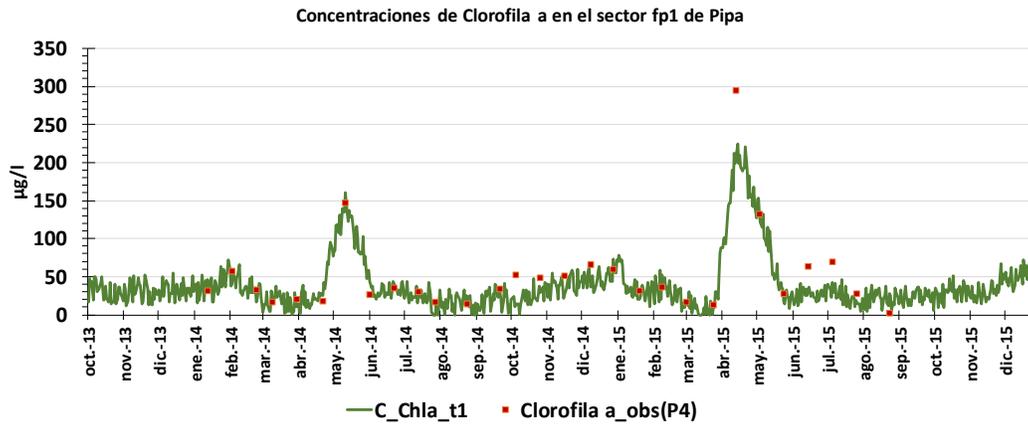
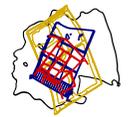
Constantes	SECTOR FG1	SECTOR FG2	SECTOR FG3	Laguna	Unidad	Constantes	SECTOR FG1	SECTOR FG2	SECTOR FG3	Laguna	Unidad
Ka	0.5	0.5	0.5	0.5	1/d	Kfosfa	0.2	0.2	0.2	0.01	1/d
T_Ka	1.024	1.024	1.024	1.024	-	T_Kfosfa	1.024	1.024	1.024	1.024	-
Kd	0	0	0	0.01	1/d	Kgrow	2	2	2	2	1/d
T_Kd	1.047	1.047	1.047	1.047	-	T_Kgrow	1.047	1.047	1.047	1.047	-
Vsd	0.05	0.05	0.05	0.01	m/d	SOD	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	g/m2/d
T_Vsd	1.024	1.024	1.024	1.024	-	SedNo3	-1	-1	-1	0	g/m2/d
Knorg	0.12	0.12	0.12	0.12	1/d	SedPinorg	0	0	0	0.1	g/m2/d
T_Knorg	1.047	1.047	1.047	1.047	-	SedNh4	0	0	0	0	g/m2/d
VsNorg	0.1	0.1	0.1	0.1	m/d	Kd1_2	0.5	0.5	0.5	0.5	mgO
T_VsNorg	1.024	1.024	1.024	1.024	-	Kn1_2	0.5	0.5	0.5	0.5	mgO
Kn	0.2	0.2	0.2	0.2	1/d	Knf1_2	0.03	0.03	0.03	0.03	mgN
T_Kn	1.083	1.083	1.083	1.083	-	Kp1_2	0.02	0.02	0.02	0.02	mgP
Kdesnit	0.1	0.1	0.1	0.1	1/d	kdn1_2	0.5	0.5	0.5	0.5	mgO
T_Kdesnit	1.045	1.045	1.045	1.045	-	Ra	4.57	4.57	4.57	4.57	mgO/mgN
Kdeath	0.25	0.25	0.25	0.25	1/d	Roresp	100	100	100	100	gO/mgChl
T_Kdeath	1.047	1.047	1.047	1.047	-	Rocrec	130	130	130	130	gO/mgChl
Vsfito	0.14	0.14	0.14	0.14	m/d	rna	15	15	15	15	gN/mgChl
T_Vsfito	1.024	1.024	1.024	1.024	-	rpa	1	1	1	1	gP/mgChl
Kfosforg	0.15	0.15	0.15	0.01	1/d	FnAN	0.8	0.8	0.8	0.8	%
T_Kfosforg	1.047	1.047	1.047	1.047	-	Fp	0.5	0.5	0.5	0.5	%
VsFosforg	0.2	0.2	0.2	0.01	m/d	KcompAd	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	1/tnP
T_VsFosforg	1.024	1.024	1.024	1.024	-	KresP	10	10	10	10	tnP
Isat	150	150	150	150	langleys	V_sed_SS	0	0	0	0	m/d
Kb	0.42	0.42	0.42	0.42	1/m	VsedSi	0	0	0	0	m/d
Katenp	0.01	0.01	0.01	0.01	l/(mg·m)						

Las constantes permanecen estables y con pequeños cambios de unos sectores a otros.

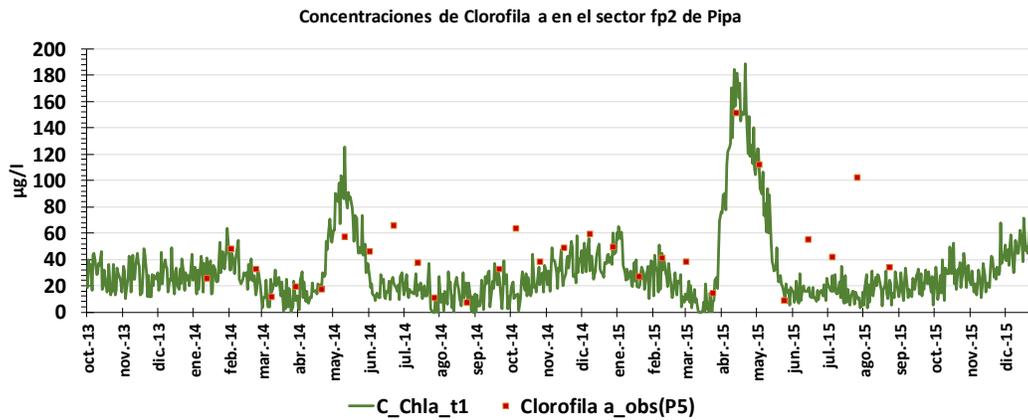
5.5.2.1. Concentraciones

Clorofila a

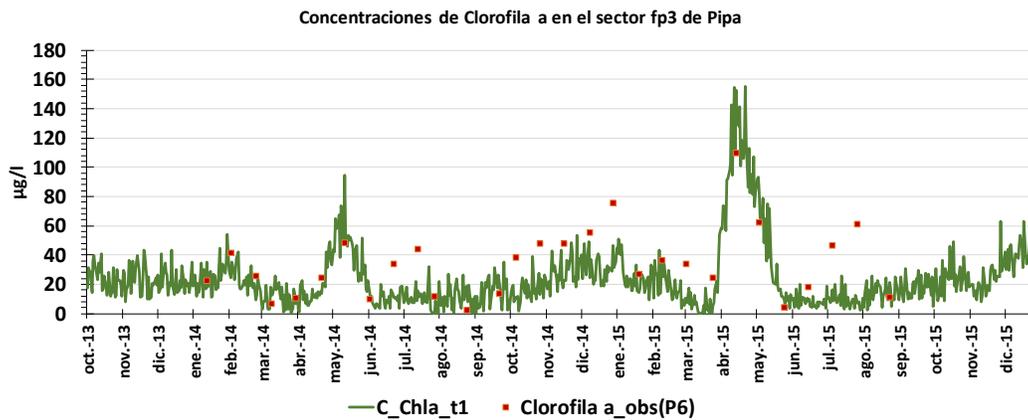
La estimación de la concentración de la clorofila *a* es considerada como un indicador robusto del fitoplancton. Por su parte, la concentración de clorofila *a* se utiliza para estimar en forma indirecta la biomasa de las comunidades fitoplanctónicas ya que es el principal pigmento fotosintético presente en los diferentes grupos de algas, también es un indicador del estado fisiológico del fitoplancton y del estado trófico de los sistemas acuáticos.



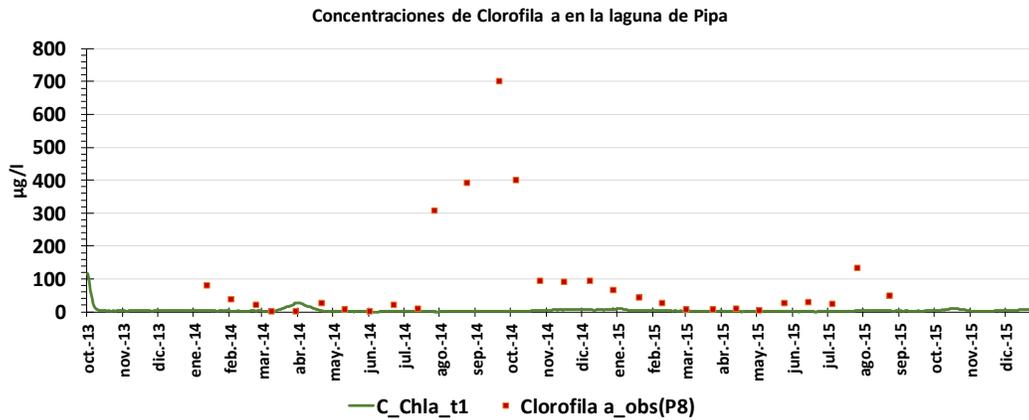
Gráfica 5-28. Calibración de Clorofila a en el Sector fp1 del tancat de Pipa.



Gráfica 5-29. Calibración de Clorofila a en el Sector fp2 del tancat de Pipa.



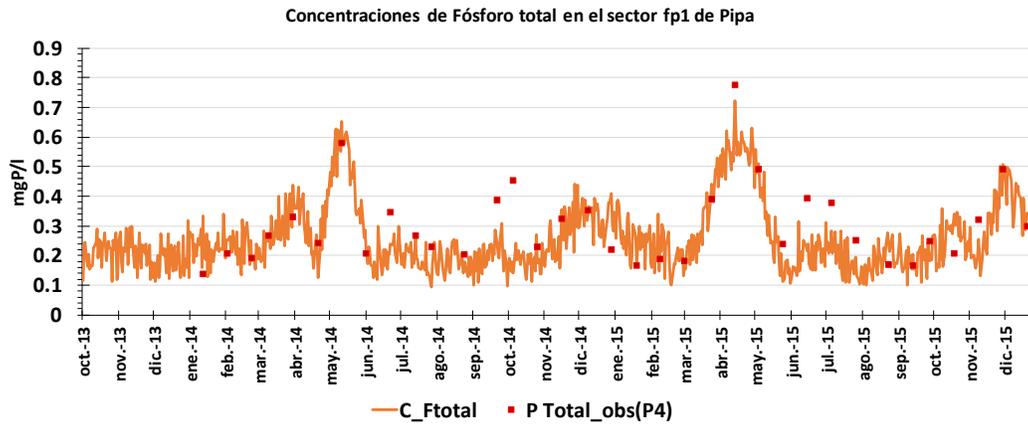
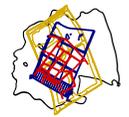
Gráfica 5-30. Calibración de Clorofila a en el Sector fp3 del tancat de Pipa.



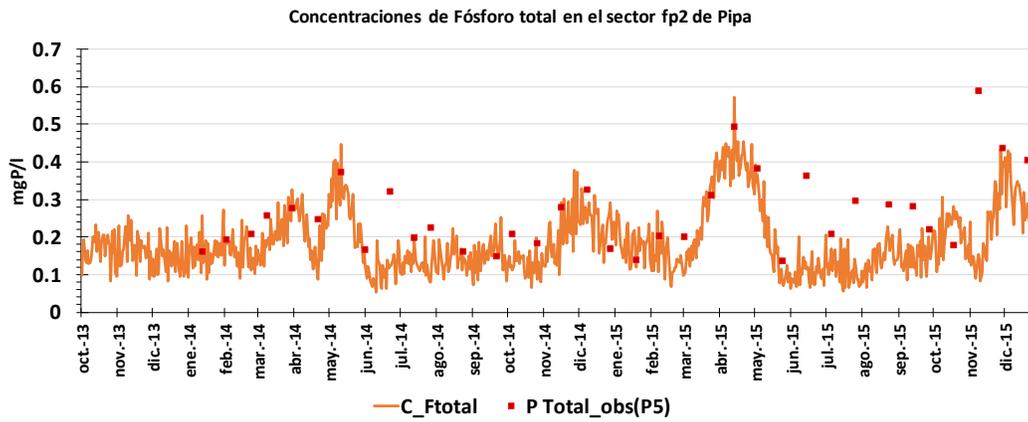
Gráfica 5-31. Calibración de Clorofila a en la laguna del tancat de Pipa.

Fósforo total

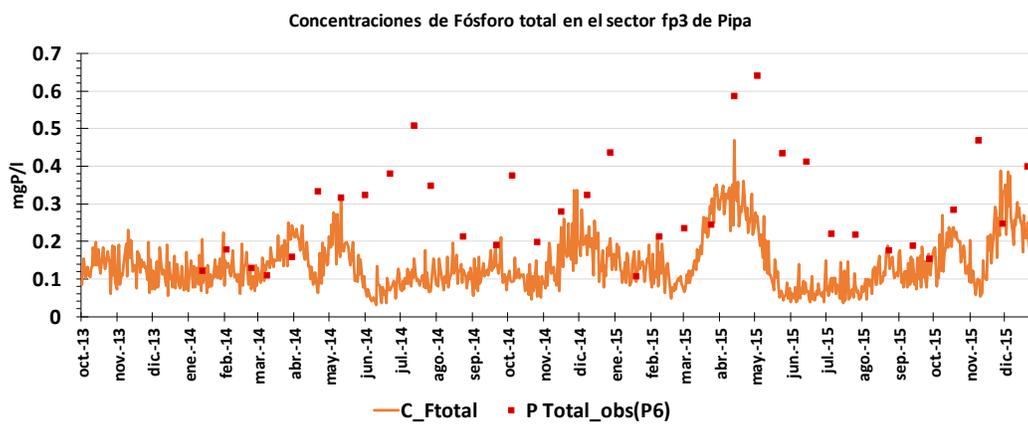
El fósforo es un nutriente indispensable para la vida de algas, plantas y organismos superiores de la cadena trófica. Sin embargo, en condiciones naturales es un elemento escaso en medios acuáticos, ya que no existe como gas. En el caso de sistemas eutrofizados gran parte del fosforo orgánico se encuentra encapsulado con el fitoplancton. El fósforo inorgánico es la fracción que directamente contribuye al crecimiento del fitoplancton y que limita de forma global sus altos incrementos. Al ser el nutriente limitante, sus concentraciones son muy bajas o inferiores a los umbrales de detección. Esto se debe a que conforme se genera es consumido rápidamente por el fitoplancton.



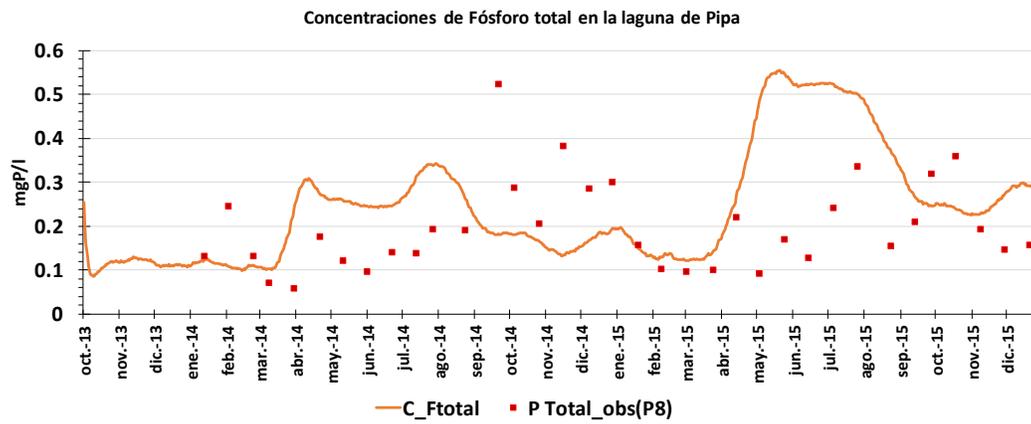
Gráfica 5-32. Calibración de Fósforo total en el Sector fp1 del tancat de Pipa.



Gráfica 5-33. Calibración de Fósforo total en el Sector fp2 del tancat de Pipa.



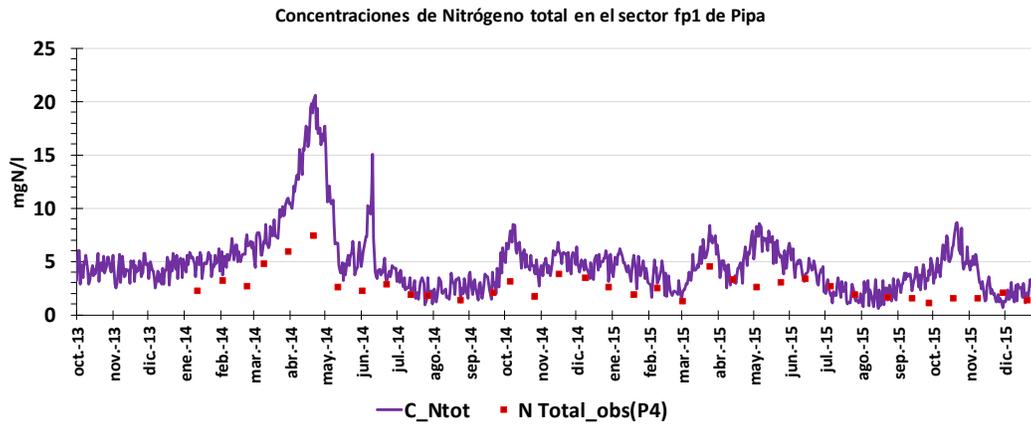
Gráfica 5-34. Calibración de Fósforo total en el Sector fp3 del tancat de Pipa.



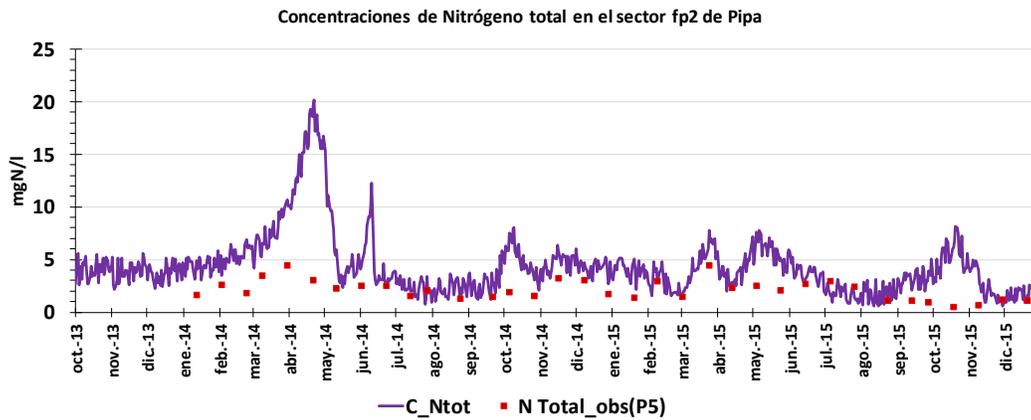
Gráfica 5-35 Calibración de Fósforo total en la laguna del tancat de Pipa.

Nitrógeno total

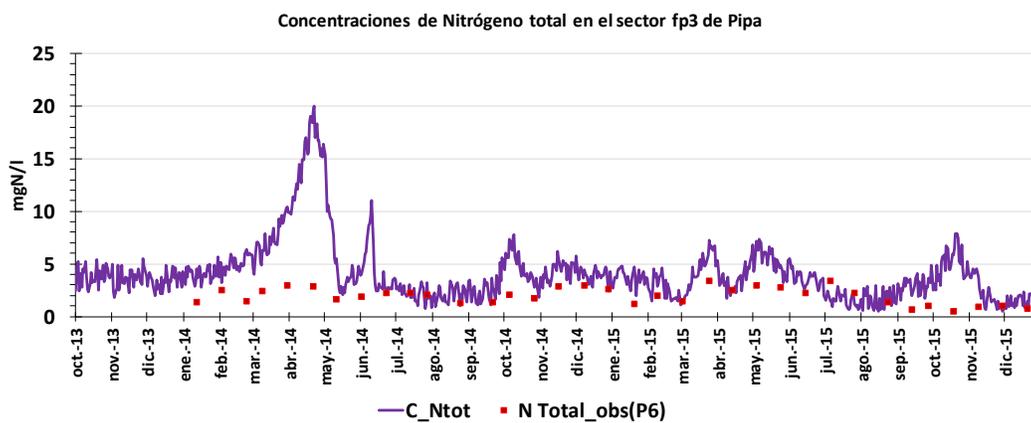
En un sistema hipereutrófico, las concentraciones de nitrógeno orgánico en gran parte suelen deberse al nitrógeno encapsulado en forma de fitoplancton..



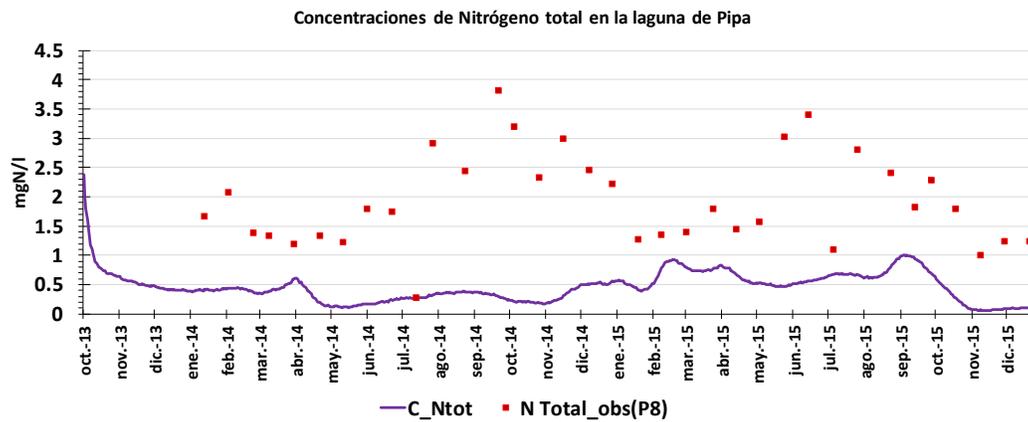
Gráfica 5-36. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector fp1 del tanca de Pipa.



Gráfica 5-37. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector fp2 del tanca de Pipa.



Gráfica 5-38. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector fp3 del tanca de Pipa.

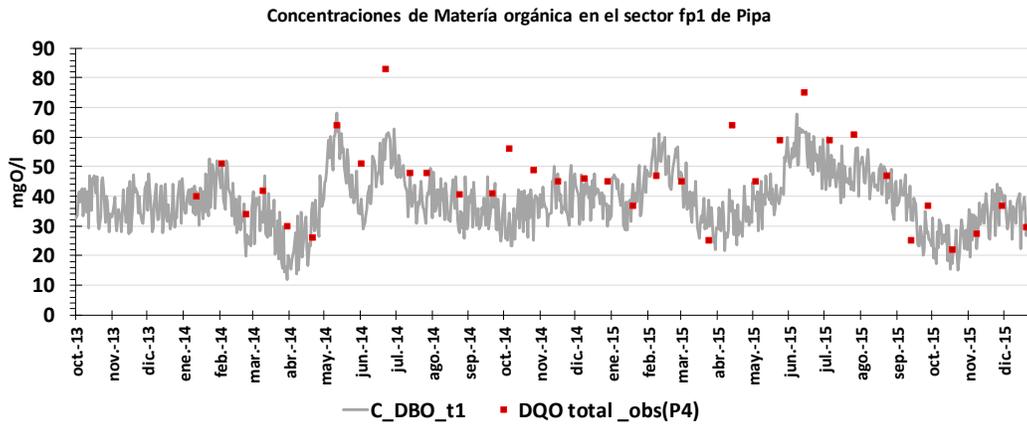
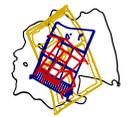


Gráfica 5-39. Calibración del Nitrógeno orgánico en la laguna del tancat de Pipa.

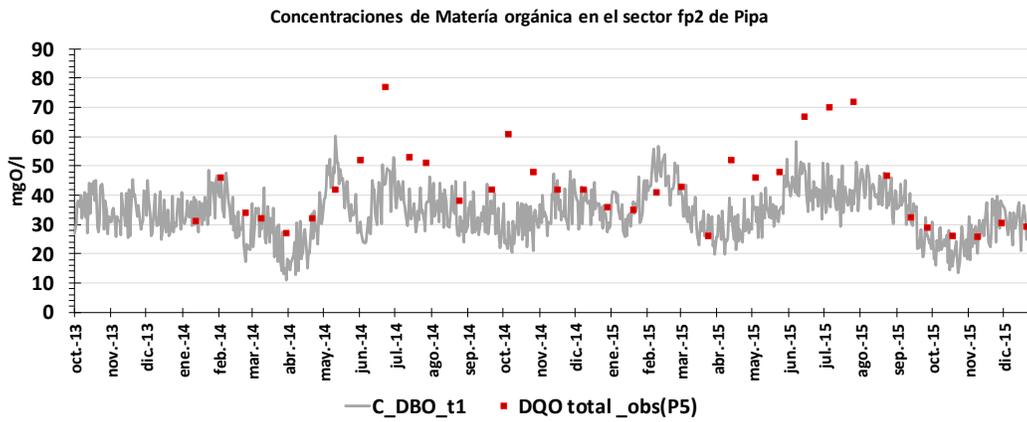
Materia orgánica

La presencia de materia orgánica y oxígeno disuelto en el lago está muy afectada por el estado hipertrófico. De hecho, presumiblemente gran parte de la materia orgánica suspendida del lago procede del propio fitoplancton.

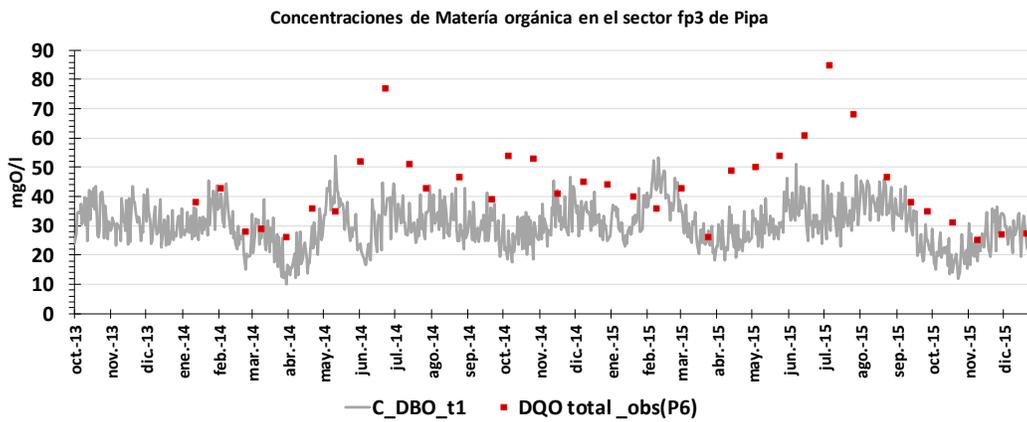
No se disponen datos de DBO_5 ya que esta prueba se ve modificada por la actividad fitoplanctónica y por tanto se decide estimar la degradación de la materia orgánica con los valores de la demanda química de oxígeno.



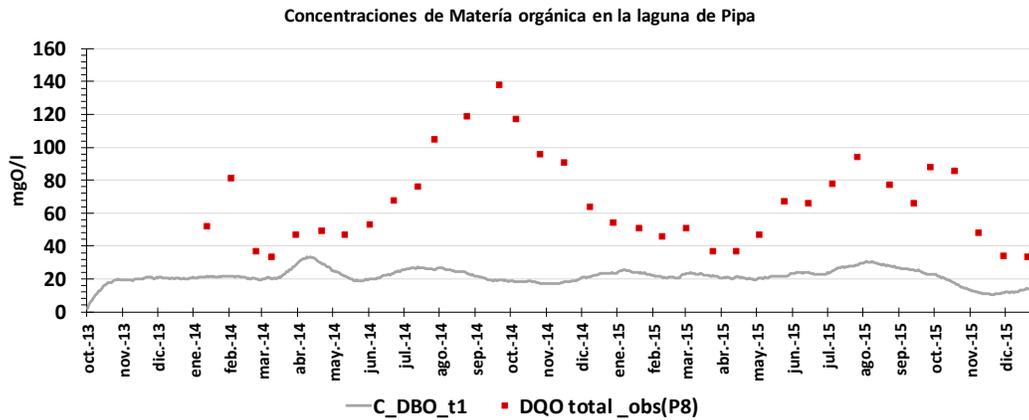
Gráfica 5-40. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector fp1 en el tancat de Pipa.



Gráfica 5-41. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector fp2 del tancat de Pipa.



Gráfica 5-42. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector fp3 del tancat de Pipa.



Gráfica 5-43. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector fp3 del tancat de Pipa.

5.5.3. Sedimentos

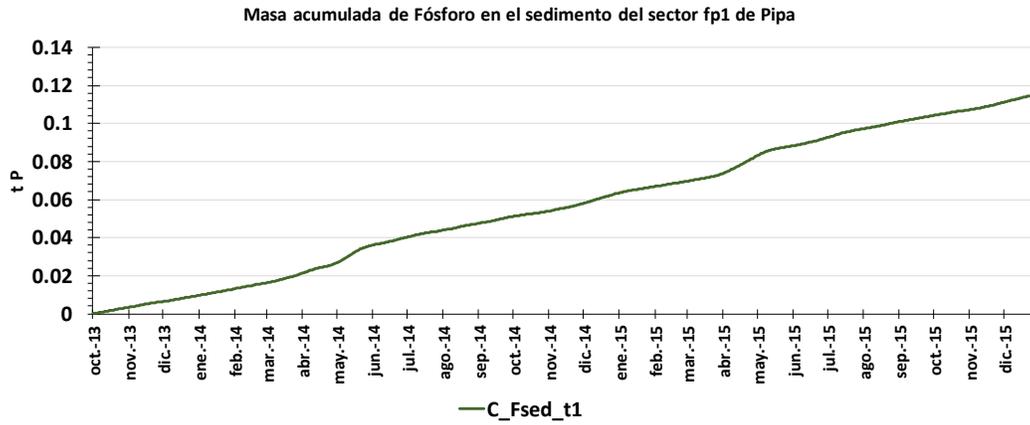
En este tipo de sistemas la interacción del sedimento con la columna de agua es muy importante. Se puede observar en el diagrama de procesos modelados por la herramienta (Ilustración 4-3) que la mayoría de nutrientes tienen relación con el sedimento, ya sea como fuente o sumidero de materia.

La correcta caracterización de los sedimentos suele ser determinante en la mayoría de modelos de este tipo de ecosistemas acuáticos. Determinar correctamente los niveles de fondo de metales en los sedimentos es un paso significativo hacia una correcta evaluación del grado de contaminación (Hernández-Crespo and Martín, 2015). Por tanto, caracterizar las interacciones de los sedimentos es muy importante para proponer las medidas adecuadas para la recuperación de su estado ecológico.

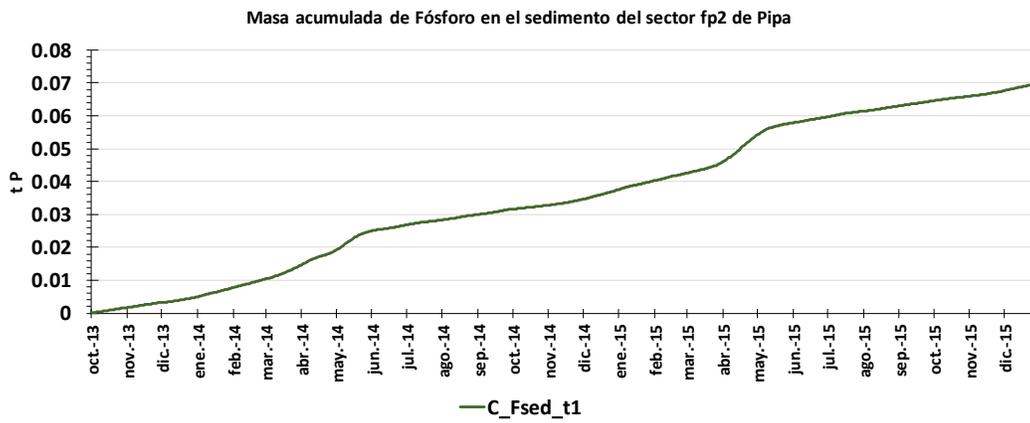
La resuspensión de fósforo desde el sedimento ha sido observada en determinados estudios (Martín et al., 2013a) en los que, si las concentraciones de entrada al humedal artificial eran bajas, se producía un efluente más concentrado. También se ha comprobado que la resuspensión de nutrientes en el lago de La Albufera supone un gran aporte de materia (del Barrio Fernández et al., 2012). La sedimentación por coprecipitación de fósforo inorgánico, puede



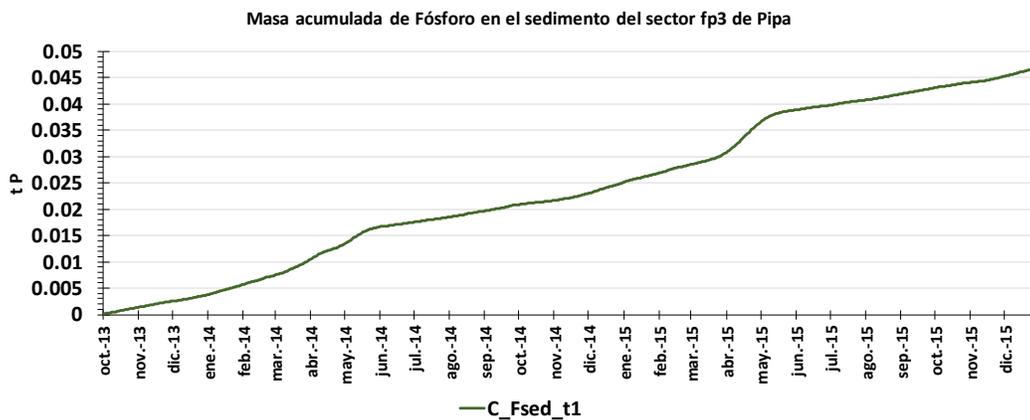
mantener bajas concentraciones de fósforo soluble en la columna de agua (Rodrigo et al., 2015). Pero puede desencadenar en una lenta recuperación de los sistemas gravemente afectados por procesos de eutrofización.



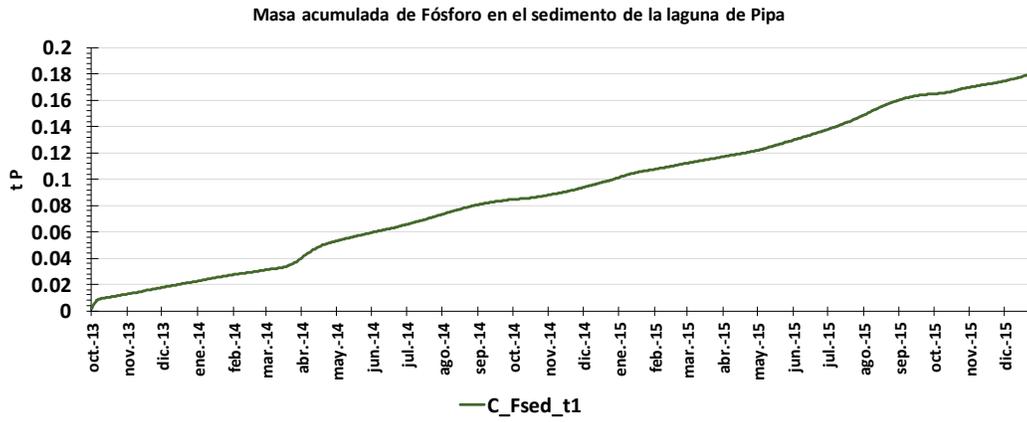
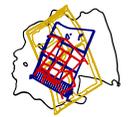
Gráfica 5-44. Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector fp1 del tancat de Pipa.



Gráfica 5-45. Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector fp2 del tancat de Pipa.



Gráfica 5-46 Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector fp3 del tancat de Pipa.

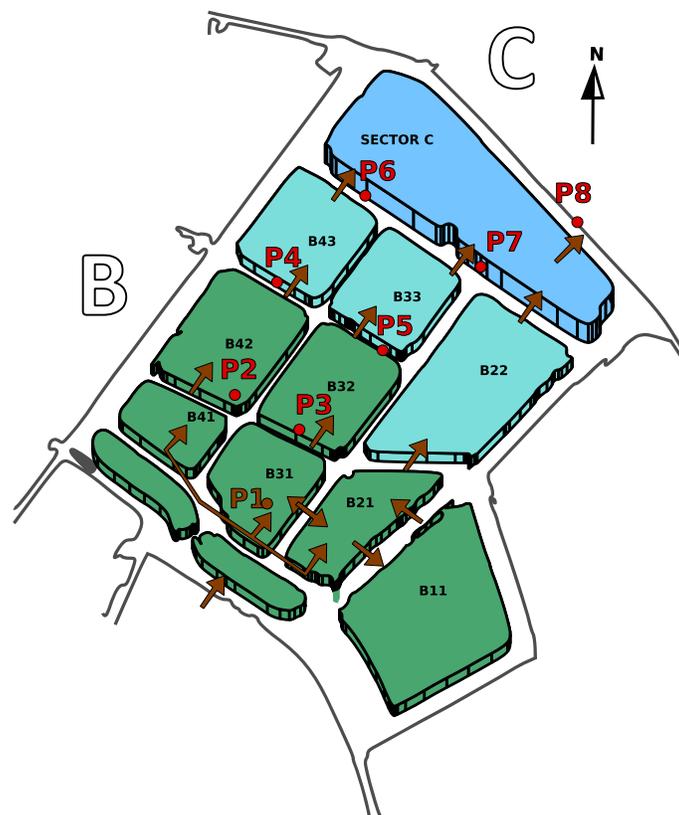


Gráfica 5-47 Masa acumulada de Fósforo en el sedimento de la laguna del tancat de Pipa.



5.6. Tancat de L'Illa

El tancat de L'Illa es un humedal artificial que cuenta con 14.2 ha. Consta de tres zonas, un primer sector de flujo subsuperficial con plantaciones de carrizo y enea, que cuenta con 0.6 ha de superficie. Un segundo sector B de flujo superficial con una superficie total de 10.4 ha. Y finalmente una laguna renaturalizadora con plantaciones caráceas de 3.2 ha.



Gráfica 5-48. Esquema del tancat de L'Illa.



5.6.1. Datos de entrada

La información utilizada para el desarrollo del modelo ha sido obtenida gracias al gran esfuerzo de las diferentes Acciones pertenecientes al Proyecto Europeo LIFE Albufera (LIFE Albufera, 2013). En este apartado se exponen los documentos consultados, además se puede acceder a ellos mediante un vínculo en cada título.

Por una parte, los datos referentes a la hidráulica del *tancat* de la Pipa han sido recopilados y estimados por la Acción B1 encargada de la gestión y monitorización de la hidráulica. El documento con título "[Informe del primer año de resultados de gestión de la hidráulica](#)" en el que se recopila tal información, es accesible desde la página web del LIFE Albufera.

Por otra parte, las concentraciones en el *tancat* para la alimentación y calibración del modelo se han obtenido de la Acción C1 encargada de la monitorización de la calidad del agua. Se puede consultar en la página web, el documento con título "[Informe del primer año de resultados de la monitorización del impacto de la gestión sobre la calidad del agua y sedimentos](#)" que recoge los trabajos realizados por la Acción. En el {ANEJO E} se pueden observar las concentraciones de cada uno de los constituyentes modelados y los perfiles dentro del *tancat*. Para la caracterización del fitoplancton y poder diferenciar las diatomeas entre el resto de especies fitoplanctónicas se han consultado el documento "[Trabajos de control de las variables biológicas para evaluar la eficiencia de los sistemas de humedales artificiales en el P.N. Albufera de Valencia](#)", también accesible desde la web.

Los datos de partida del modelo son los caudales y concentraciones del punto de muestro (P3) del *tancat*. Para evitar que los resultados se vean afectados por las condiciones iniciales impuestas en el modelo, se decide alargar la serie tres meses. De este modo, anteriores al inicio de datos muestreados, se disponen de tres meses de calentamiento, siendo el periodo de simulación del 1 de octubre de 2013 al 31 de diciembre de 2015.



Se han obtenido series diarias a partir de los muestreos en el punto de entrada al *tancat*, estas se han generado a partir de los valores interpolados y un pequeño coeficiente aleatorio. De este modo se pueden obtener numerosas series de entrada y comprobar la influencia de la incertidumbre en las series de entrada. También se puede aplicar el uso de la optimización estocástica permitiendo incluir el efecto de la incertidumbre en las aportaciones.

5.6.2. *Resultados y calibración*

En este caso concreto se ha realizado una primera calibración automática para estimar grosso modo los parámetros del modelo. Esta calibración se ha realizado para los sectores B y C, en el resto del proceso se ha procedido con una calibración manual. Se ha calibrado teniendo en cuenta los puntos P2, P4, P6 y P8. Siendo estos los muestreos característicos de los caudales de salida de cada sector.

Se puede observar en la siguiente ilustración un esquema de la sectorización realizada para la modelización y calibración del *tancat*. Los resultados del sector anterior sirven de entradas para el sector siguiente.

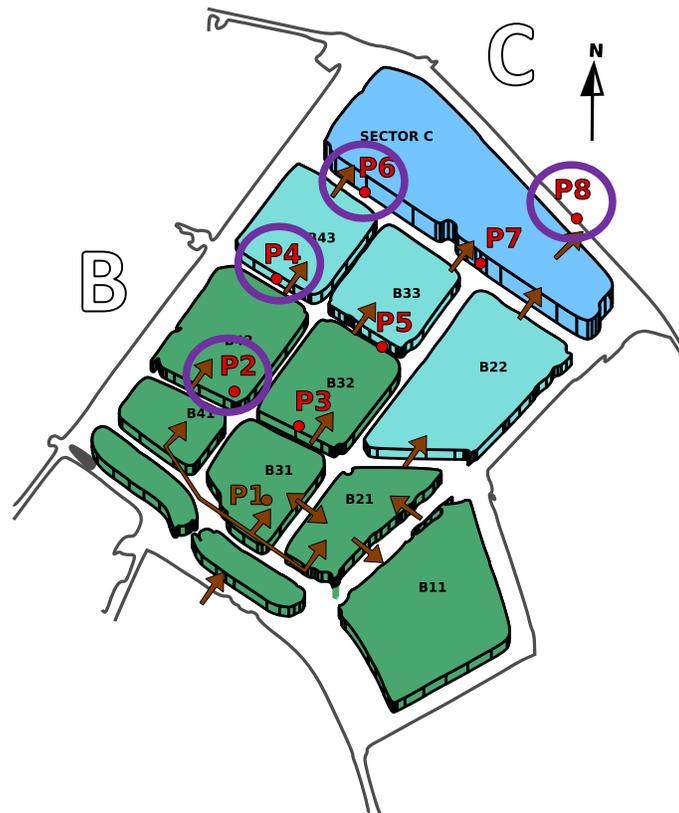


Ilustración 5-20. Puntos de calibración en el tancat de la Pipa.

5.6.2.1. Hidráulica

La caracterización hidráulica del modelo se representa en la siguiente ilustración. Los caudales de entrada en los sectores B están medidos en el punto P1. Para el calculo del balnce en el humedal completo se han realizado dos modelos independientes trabajando en paralelo.

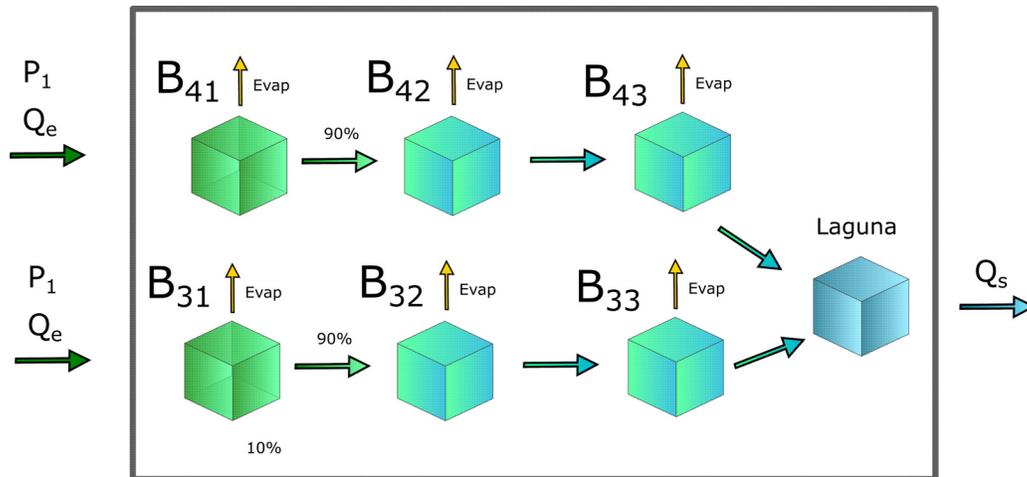


Ilustración 5-21. Modelo conceptual del balance hidráulico en los sectores del tancat de L'Illa.

Los caudales de salida de cada tanque sirven como los caudales de entrada del siguiente. Además, las concentraciones calculadas en cada tanque son los valores de entrada para el siguiente sector. De esta manera se consigue un sistema independiente capaz de predecir los caudales y concentraciones de salida del humedal. Los puntos de muestreo intermedios del sistema sirven para la calibración y comprobar el correcto funcionamiento del sistema.

5.6.2.2. Constantes

Las constantes calibradas de los cuatro sectores se muestran en la siguiente tabla. El significado y descripción de cada constante se describe en la metodología en la siguiente tabla.



Tabla 5-4. Constantes calibradas en el tancat de Pipa.

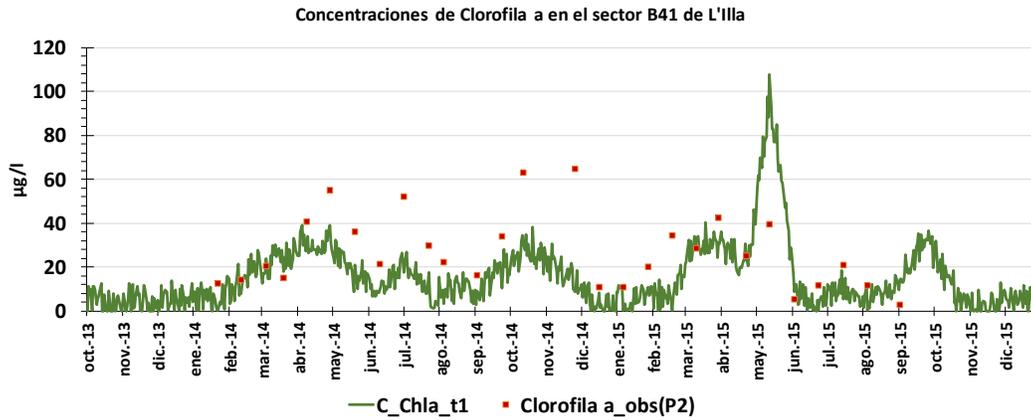
Constantes	SECTOR B41	SECTOR B42	SECTOR B43	Laguna	Unidad	Constantes	SECTOR B41	SECTOR B42	SECTOR B43	Laguna	Unidad
Ka	0.5	0.5	0.5	0.5	1/d	Kfosfa	0.2	0.2	0.2	0.01	1/d
T_Ka	1.024	1.024	1.024	1.024	-	T_Kfosfa	1.024	1.024	1.024	1.024	-
Kd	0	0	0	0.01	1/d	Kgrow	2	2	2	2	1/d
T_Kd	1.047	1.047	1.047	1.047	-	T_Kgrow	1.047	1.047	1.047	1.047	-
Vsd	0.05	0.05	0.05	0.01	m/d	SOD	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	g/m2/d
T_Vsd	1.024	1.024	1.024	1.024	-	SedNo3	-1	-1	-1	0	g/m2/d
Knorg	0.12	0.12	0.12	0.12	1/d	SedPinorg	0	0	0	0.1	g/m2/d
T_Knorg	1.047	1.047	1.047	1.047	-	SedNh4	0	0	0	0	g/m2/d
VsNorg	0.1	0.1	0.1	0.1	m/d	Kd1_2	0.5	0.5	0.5	0.5	mgO
T_VsNorg	1.024	1.024	1.024	1.024	-	Kn1_2	0.5	0.5	0.5	0.5	mgO
Kn	0.2	0.2	0.2	0.2	1/d	Knf1_2	0.03	0.03	0.03	0.03	mgN
T_Kn	1.083	1.083	1.083	1.083	-	Kp1_2	0.02	0.02	0.02	0.02	mgP
Kdesnit	0.1	0.1	0.1	0.1	1/d	kdn1_2	0.5	0.5	0.5	0.5	mgO
T_Kdesnit	1.045	1.045	1.045	1.045	-	Ra	4.57	4.57	4.57	4.57	mgO/mgN
Kdeath	0.25	0.25	0.25	0.25	1/d	Roresp	100	100	100	100	gO/mgChl
T_Kdeath	1.047	1.047	1.047	1.047	-	Rocrec	130	130	130	130	gO/mgChl
Vsfito	0.14	0.14	0.14	0.14	m/d	rna	15	15	15	15	gN/mgChl
T_Vsfito	1.024	1.024	1.024	1.024	-	rpa	1	1	1	1	gP/mgChl
Kfosforg	0.15	0.15	0.15	0.01	1/d	FnAN	0.8	0.8	0.8	0.8	%
T_Kfosforg	1.047	1.047	1.047	1.047	-	Fp	0.5	0.5	0.5	0.5	%
VsFosforg	0.2	0.2	0.2	0.01	m/d	KcompAd	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	1/tnP
T_VsFosforg	1.024	1.024	1.024	1.024	-	KresP	10	10	10	10	tnP
Isat	150	150	150	150	langleys	V_sed_SS	0	0	0	0	m/d
Kb	0.42	0.42	0.42	0.42	1/m	VsedSi	0	0	0	0	m/d
Katenp	0.01	0.01	0.01	0.01	l/(mg·m)						

Las constantes permanecen estables y con pequeños cambios de unos sectores a otros.

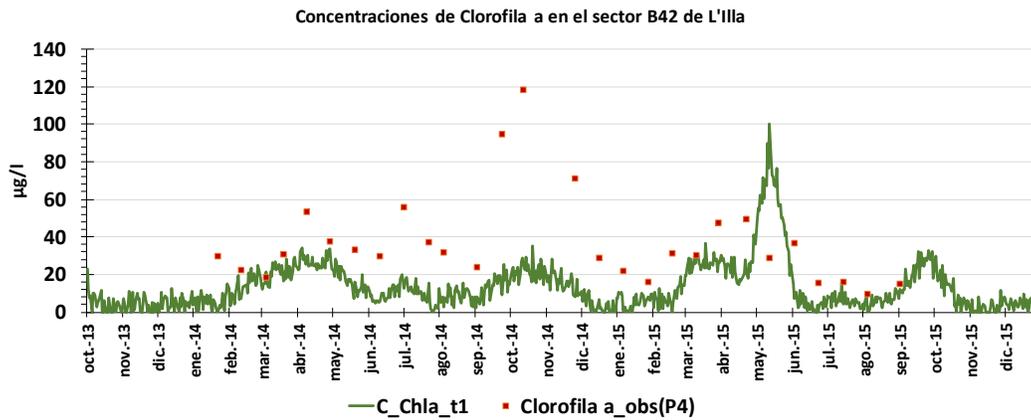
5.6.2.3. Concentraciones

Clorofila a

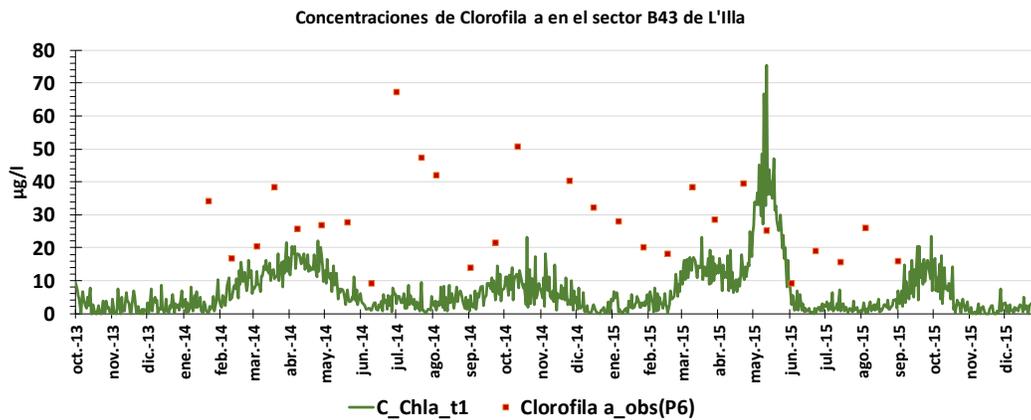
La estimación de la concentración de la clorofila *a* es considerada como un indicador robusto del fitoplancton. Por su parte, la concentración de clorofila *a* se utiliza para estimar en forma indirecta la biomasa de las comunidades fitoplanctónicas ya que es el principal pigmento fotosintético presente en los diferentes grupos de algas, también es un indicador del estado fisiológico del fitoplancton y del estado trófico de los sistemas acuáticos.



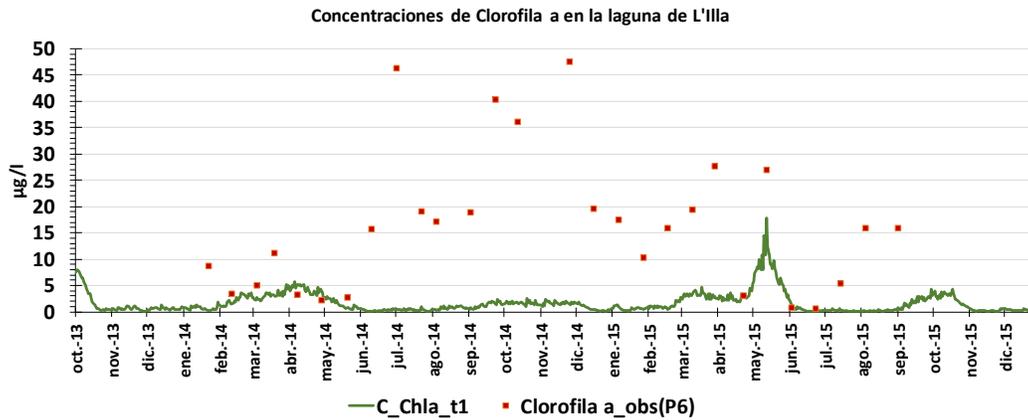
Gráfica 5-49. Calibración de Clorofila a en el Sector B41 del tancat de L'Illa.



Gráfica 5-50. Calibración de Clorofila a en el Sector B42 del tancat de L'Illa.



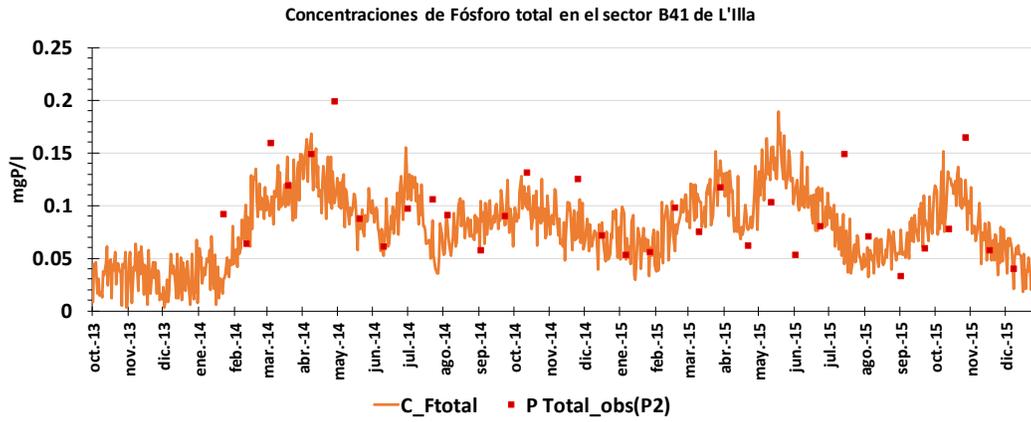
Gráfica 5-51. Calibración de Clorofila a en el Sector B43 del tancat de L'Illa.



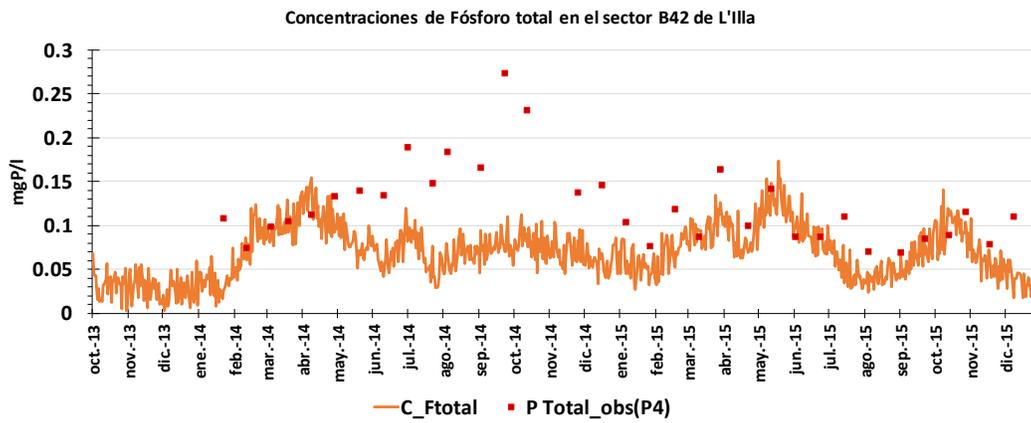
Gráfica 5-52. Calibración de Clorofila a en la laguna del tanca de L'Illa.

Fósforo total

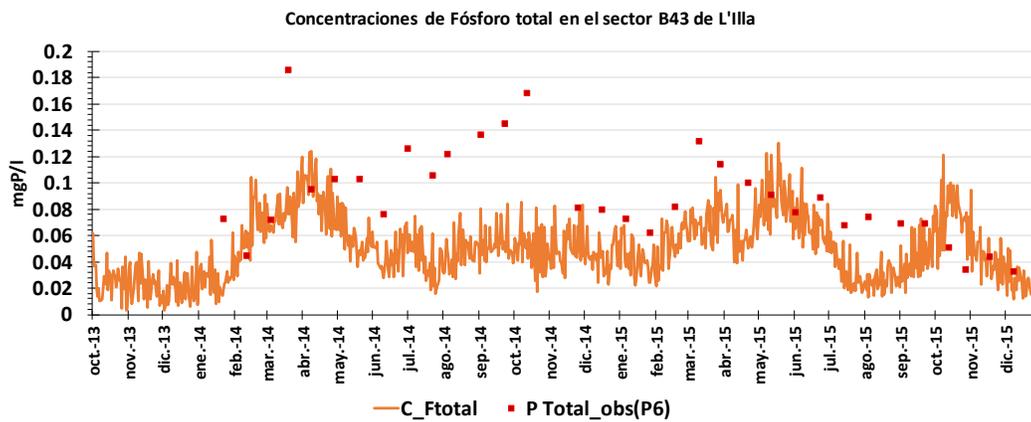
El fósforo es un nutriente indispensable para la vida de algas, plantas y organismos superiores de la cadena trófica. Sin embargo, en condiciones naturales es un elemento escaso en medios acuáticos, ya que no existe como gas. En el caso de sistemas eutrofizados gran parte del fosforo orgánico se encuentra encapsulado con el fitoplancton. El fósforo inorgánico es la fracción que directamente contribuye al crecimiento del fitoplancton y que limita de forma global sus altos incrementos. Al ser el nutriente limitante, sus concentraciones son muy bajas o inferiores a los umbrales de detección. Esto se debe a que conforme se genera es consumido rápidamente por el fitoplancton.



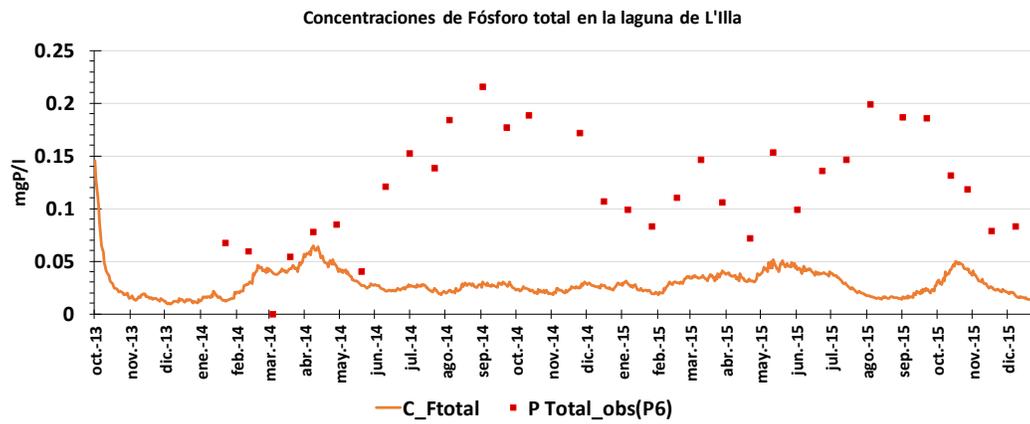
Gráfica 5-53. Calibración de Fósforo total en el Sector B41 del tancat de L'Illa.



Gráfica 5-54. Calibración de Fósforo total en el Sector B42 del tancat de L'Illa.



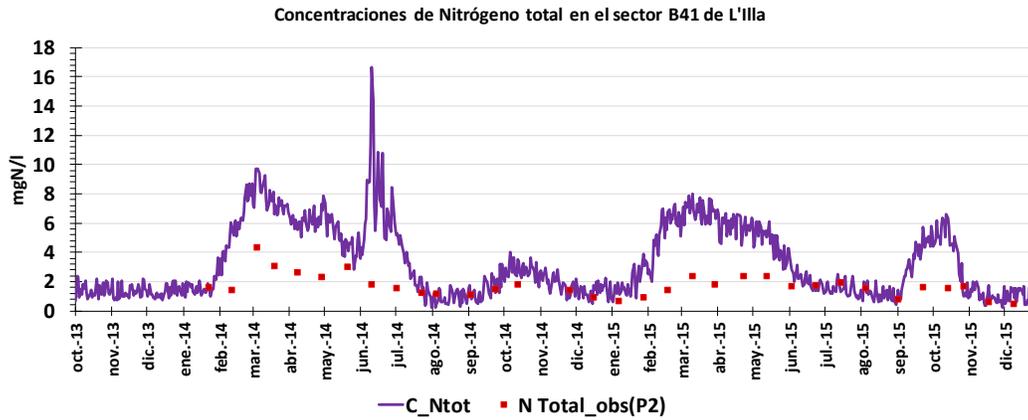
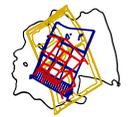
Gráfica 5-55. Calibración de Fósforo total en el Sector B43 del tancat de L'Illa.



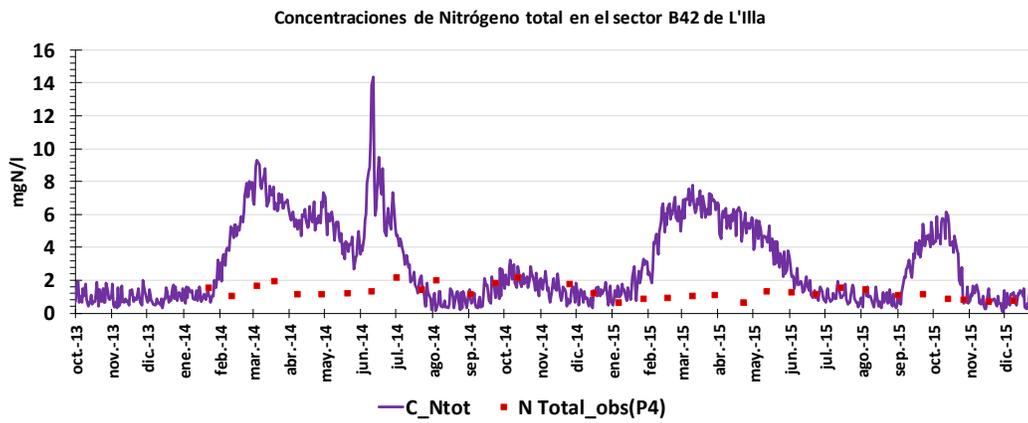
Gráfica 5-56 Calibración de Fósforo total en la laguna del tancat de L'Illa.

Nitrógeno total

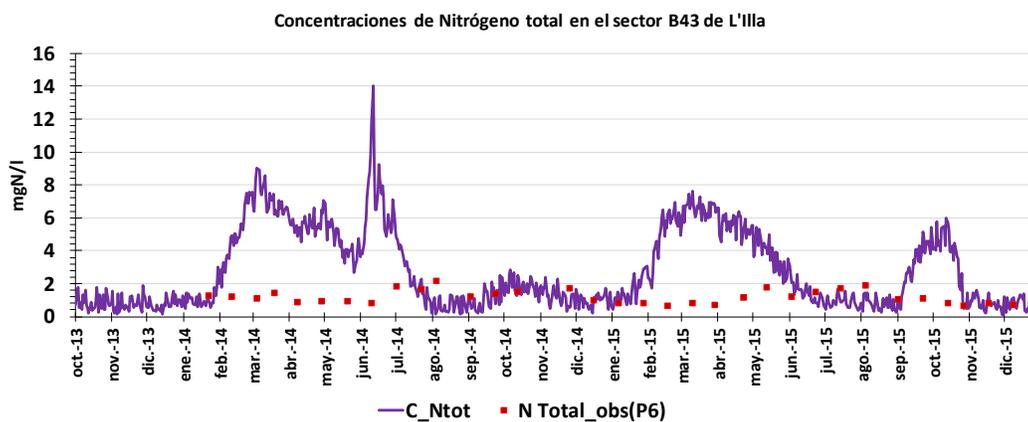
En un sistema hipereutrófico, las concentraciones de nitrógeno orgánico en gran parte suelen deberse al nitrógeno encapsulado en forma de fitoplancton.



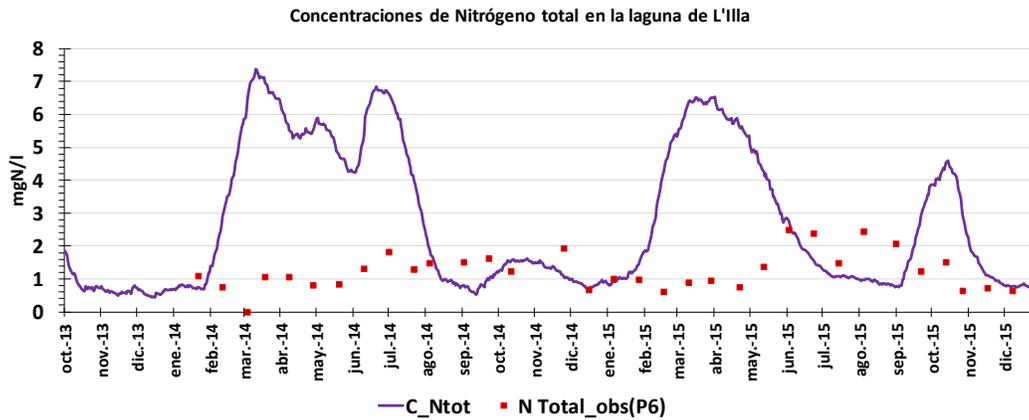
Gráfica 5-57. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector B41 del tancat de L'Illa.



Gráfica 5-58. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector B42 del tancat de L'Illa.



Gráfica 5-59. Calibración del Nitrógeno orgánico en el Sector B43 del tancat de L'Illa.

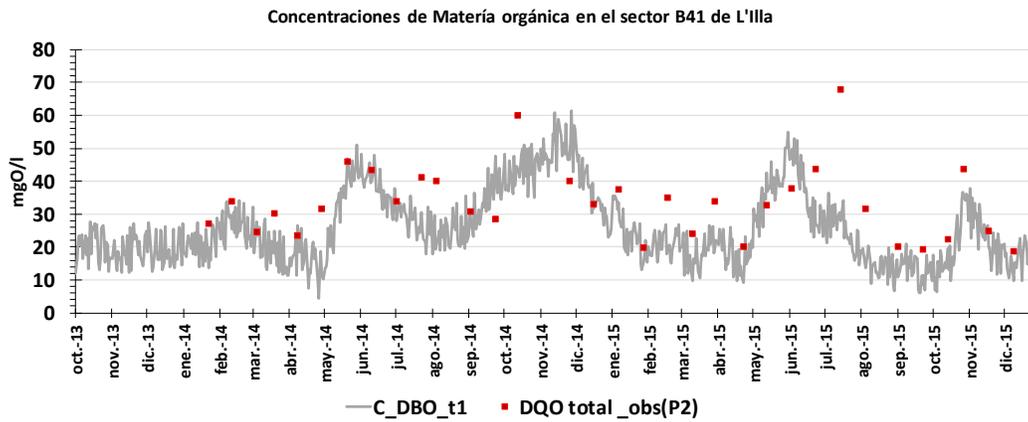
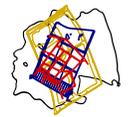


Gráfica 5-60. Calibración del Nitrógeno orgánico en la laguna del tancat de L'Illa.

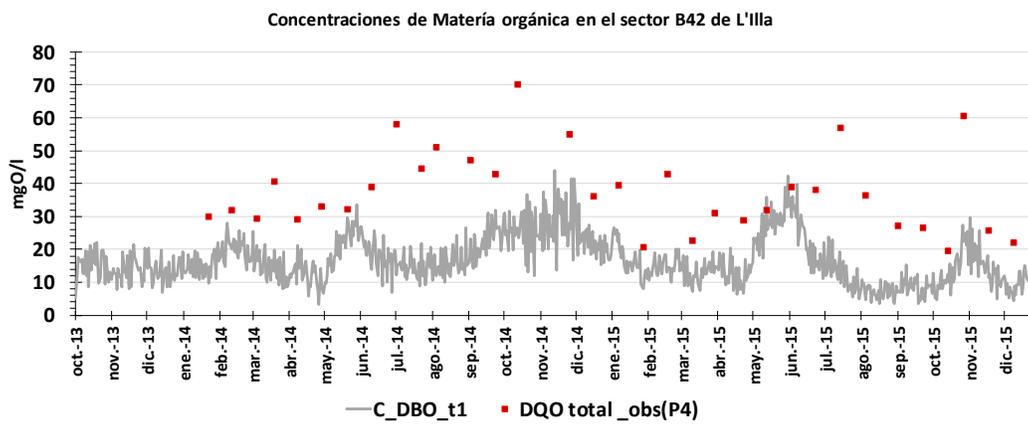
Materia orgánica

La presencia de materia orgánica y oxígeno disuelto en el lago está muy afectada por el estado hipertrófico. De hecho, presumiblemente gran parte de la materia orgánica suspendida del lago procede del propio fitoplancton.

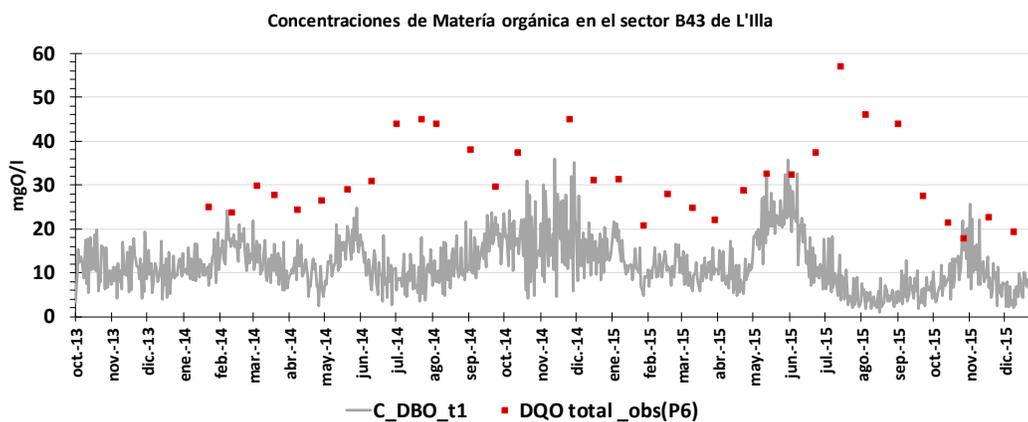
No se disponen datos de DBO_5 ya que esta prueba se ve modificada por la actividad fitoplanctónica y por tanto se decide estimar la degradación de la materia orgánica con los valores de la demanda química de oxígeno.



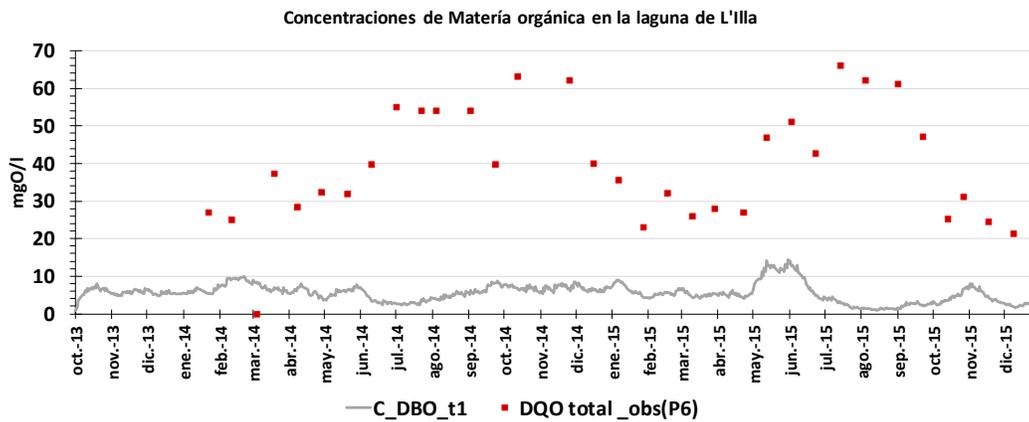
Gráfica 5-61. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector B41 en el tancat de L'Illa.



Gráfica 5-62. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector B42 del tancat de L'Illa.



Gráfica 5-63. Calibración de la Materia Orgánica en el Sector B43 del tancat de L'Illa.



Gráfica 5-64. Calibración de la Materia Orgánica en la laguna del tancat de L'Illa.

5.6.3. Sedimentos

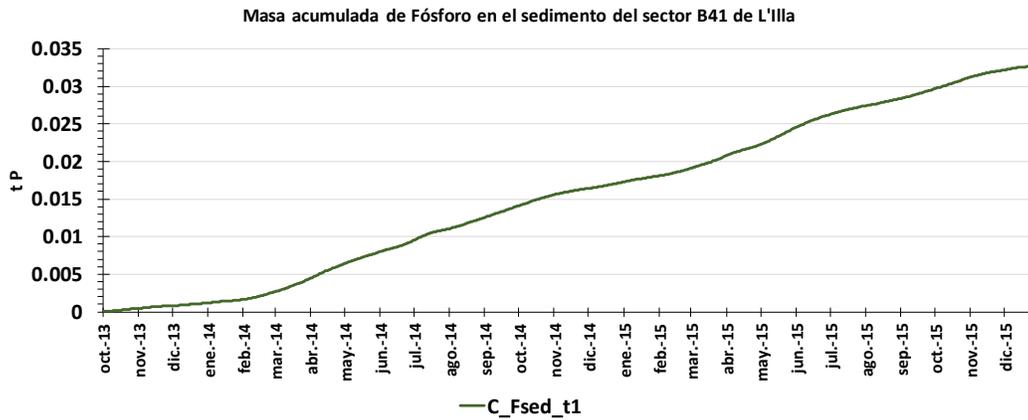
En este tipo de sistemas la interacción del sedimento con la columna de agua es muy importante. Se puede observar en el diagrama de procesos modelados por la herramienta (Ilustración 4-3) que la mayoría de nutrientes tienen relación con el sedimento, ya sea como fuente o sumidero de materia.

La correcta caracterización de los sedimentos suele ser determinante en la mayoría de modelos de este tipo de ecosistemas acuáticos. Determinar correctamente los niveles de fondo de metales en los sedimentos es un paso significativo hacia una correcta evaluación del grado de contaminación (Hernández-Crespo and Martín, 2015). Por tanto, caracterizar las interacciones de los sedimentos es muy importante para proponer las medidas adecuadas para la recuperación de su estado ecológico.

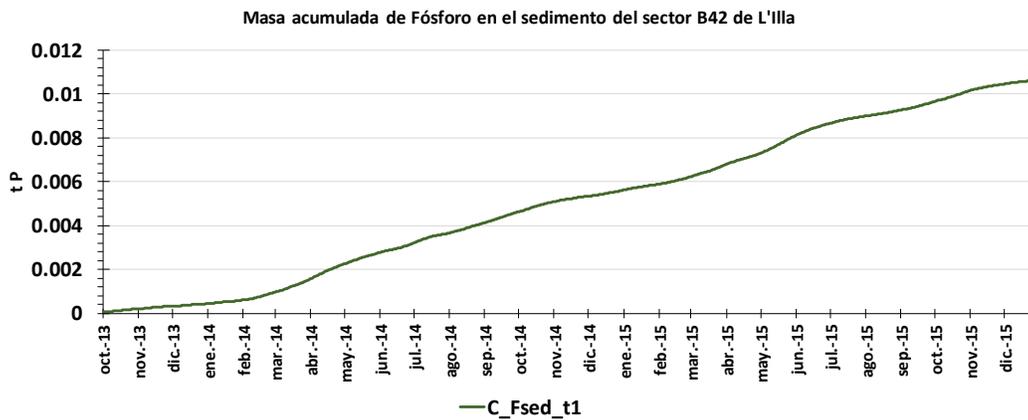
La resuspensión de fósforo desde el sedimento ha sido observada en determinados estudios (Martín et al., 2013a) en los que, si las concentraciones de entrada al humedal artificial eran bajas, se producía un efluente más concentrado. También se ha comprobado que la resuspensión de nutrientes en el lago de La Albufera supone un gran aporte de materia (del Barrio Fernández



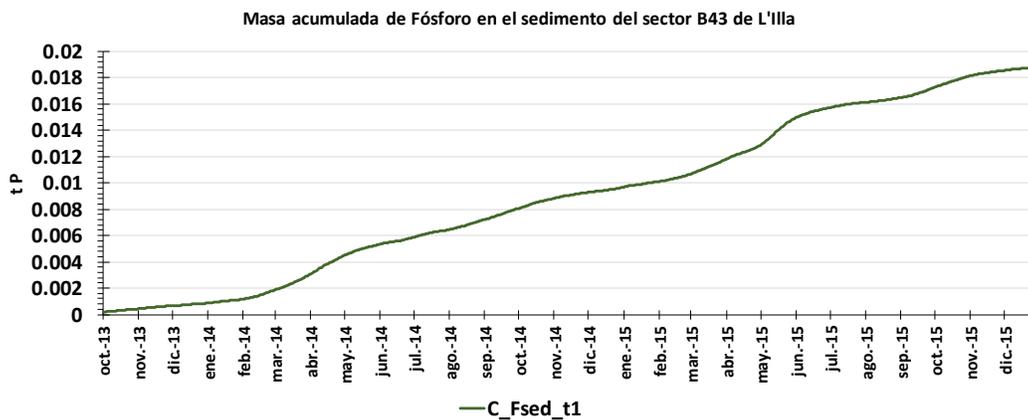
et al., 2012). La sedimentación por coprecipitación de fósforo inorgánico, puede mantener bajas concentraciones de fósforo soluble en la columna de agua (Rodrigo et al., 2015). Pero puede desencadenar en una lenta recuperación de los sistemas gravemente afectados por procesos de eutrofización.



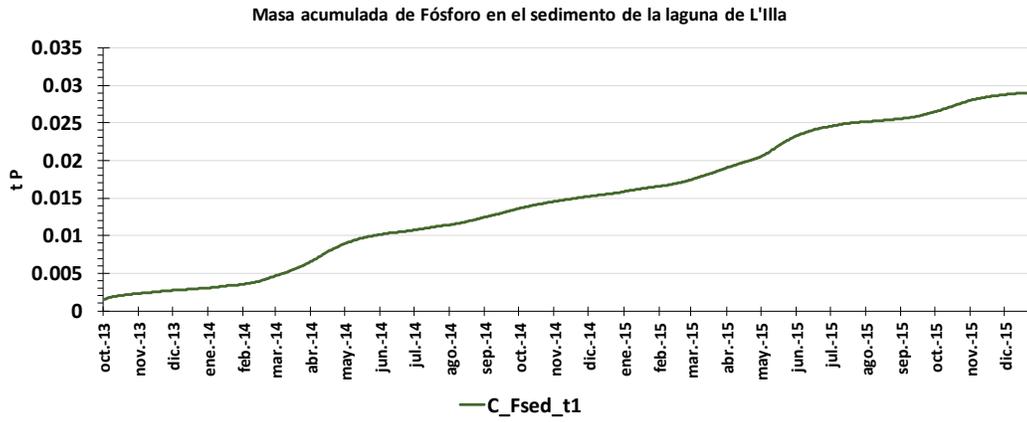
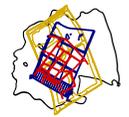
Gráfica 5-65. Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector B41 del tancat de L'Illa.



Gráfica 5-66. Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector B42 del tancat de L'Illa.



Gráfica 5-67 Masa acumulada de Fósforo en el sedimento del Sector B43 del tancat de L'Illa.



Gráfica 5-68 Masa acumulada de Fósforo en el sedimento de la laguna del tancat de L'Illa.



6. CONCLUSIONES

En este apartado de la memoria y tras haber aplicado la metodología al caso de estudio del lago de la Albufera y los *tancats* del PNAV, se resumen las conclusiones extraídas del cálculo de la calidad del agua y del comportamiento de la aplicación desarrollada en este documento para el análisis y modelación de humedales.

- En primer lugar, se ha conseguido **desarrollar una herramienta** capaz de simular satisfactoriamente algunos de los procesos físicos, químicos y biológicos que se dan en humedales y en sistemas acuáticos similares.
- La herramienta para el cálculo de la **calidad del agua** está enfocada a determinar las concentraciones en **sistemas eutrofizados**, con el objetivo de cumplir las exigencias establecidas en la **DMA**. La modelación implica, necesariamente, una simplificación de la realidad, a pesar de ello se ha conseguido representar los procesos más determinantes que afectan a estos sistemas. De este modo se ha alcanzado el objetivo de implementar un programa capaz de ayudar a la gestión en función del estudio de diferentes **escenarios**.
- El caso de estudio seleccionado ha sido el **tancat de Milia**, en el que se producen reducciones importantes de todas las concentraciones de nutrientes. En base a los resultados, se ha comprobado que el primer humedal (sector A) tiene un alto rendimiento en la reducción de las cargas. Este sector es un humedal subsuperficial que actúa a modo de filtro y además no se ve afectado por el efecto concentrador de la evaporación. El sector B es un humedal superficial que ocupa la mayor parte de la superficie del tancat. En él se producen ligeros aumentos de concentraciones debido entre otros aspectos a la acción de las aves. Este humedal tiene un efecto laminador de los caudales además de ayudar a mejorar el estado ecológico de las aguas. También consigue aumentar las concentraciones de oxígeno disuelto reduciendo las



situaciones anóxicas. Finalmente se encuentra el sector C que consiste en una pequeña laguna en la que se homogenizan las concentraciones y se reducen ciertas concentraciones pico.

- Se han recopilado todos los **datos hidráulicos** necesarios para el cálculo del balance hídrico. Estas entradas son necesarias para una correcta caracterización del medio y para el posterior cálculo de la calidad del agua.
- Las series de entrada con las **características físico-químicas y biológicas** han sido recopiladas y estructuradas en este documento. Estos datos son necesarios para el cálculo de las concentraciones mediante la ecuación general de la conservación de materia.
- Se ha desarrollado un **modelo de calidad de agua del tancat Milia** constituido por tres tanques interconectados que representan cada uno de los humedales. Los resultados que se han obtenido demuestran que los rendimientos depurativos calculados con el modelo se ajustan a la realidad observada. El modelo representa correctamente el funcionamiento del tancat y de los principales procesos que se dan en él. De este modo se obtiene una herramienta útil para la mejora y optimización de la gestión en base a alcanzar los objetivos de la DMA.
- El cálculo del **pH mediante una RNA** ha sido una experiencia interesante y útil para representar procesos complejos de reproducir. Se han obtenido muy buenos resultados y se puede presentar como futuras líneas de investigación. Se recomienda su uso en casos con muchos datos para que el método sea capaz de aprender de la variabilidad de los patrones y por tanto las estimaciones de los valores sean cada vez más precisas.
- También se ha conseguido desarrollar una **metodología de calibración** propia para el correcto ajuste de los parámetros del modelo. Esto supone una innovación en el campo de la modelación de la calidad ya que ayuda a una correcta caracterización de los medios acuáticos



simulados. En este caso el algoritmo de calibración utilizado se basa en la unión de dos métodos, el del Hipercubo Latino y el algoritmo de Rosenbrock. También se ha tenido en cuenta la necesidad de utilizar funciones objetivo basadas en indicadores estadísticos debido a las **incertidumbres** presentes en los datos de entrada de los modelos de calidad de aguas.

- Existe una diferencia en los rendimientos de depuración cuando se bombea de manera continua o discontinua, según el modelo. Cuando se ha simulado con un caudal discontinuo de entrada, la reducción másica de clorofila *a* anual es de 168 kg·año⁻¹ a 49.8 kg·año⁻¹ (rendimiento del 70%). En cambio, cuando se ha simulado con unos caudales constantes se produce una reducción de clorofila *a* de 168 kg·año⁻¹ a 43.8 kg·año⁻¹ (rendimiento 74%). Se consigue de este modo con un cambio en la **gestión** del humedal aumentar el rendimiento en 6 kg·año⁻¹.
- Mediante el uso de simulaciones se ha comprobado que el humedal ha sido capaz de atrapar durante el año 2014 una cantidad de 300 kg de **masa de fósforo**. Este valor es muy próximo al realmente observado, de lo cual se concluye que el modelo está preparado para representar la realidad de una forma fiable. Esta retirada de carga de las aguas provenientes del lago de La Albufera, o de cualquier ecosistema acuático eutrofizado, implica una mejora cualitativa de los aportes. A pesar de ello hay que tener en cuenta que en este tipo de sistemas no se crea ni se destruyen nutrientes, solo se transforman o se relocalizan del agua al sedimento o a los tejidos de las plantas. Por esta razón es necesario un estudio sobre la correcta gestión para alargar la vida útil de estos sistemas.

En resumen, la herramienta desarrollada en este documento es una primera versión que de forma sencilla permite modelar la calidad del agua en sistemas acuáticos someros. Además, es de código libre y su implementación se adjunta en los anejos de esta memoria. Está



programado en el lenguaje orientado a objetos VB.NET para su posterior uso, modificación, ampliación y/o mejora. En este documento se recopilan los datos hidráulicos, físico-químicos y biológicos, que caracterizan las series de entradas al modelo. Los resultados obtenidos en el *tancat* de Milia con esta herramienta describen un buen comportamiento y unos buenos ajustes globales. Además, la metodología propia de calibración facilita esta labor de ajuste. El uso de una RNA ha permitido comprobar un buen funcionamiento de este tipo de modelos para constituyentes difíciles de determinar. Finalmente se comprueba, que mediante la modelación de este tipo de sistemas acuáticos se puede estudiar la optimización de su gestión y de este modo obtener los mayores rendimientos de depuración.



7. REFERENCIAS

- Andreu, J., Capilla, J., Sanchís, E., 1996. AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *J. Hydrol.* 177, 269–291. doi:10.1016/0022-1694(95)02963-X
- Apha, Awwa, Wef, 1999. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Stand. Methods Exam. Water Wastewater 1496.
- Azimi, S., Gratie, C., Ivanov, S., Petre, I., 2015. Dependency graphs and mass conservation in reaction systems. *Theor. Comput. Sci.* 598, 23–39. doi:10.1016/j.tcs.2015.02.014
- Barat, R., van Loosdrecht, M.C.M.C.M., 2006. Potential phosphorus recovery in a WWTP with the BCFS® process: Interactions with the biological process. *Water Res.* 40, 3507–3516. doi:10.1016/j.watres.2006.08.006
- Belda, E., 2015. Desarrollo de herramientas para el análisis y modelación de calidad de aguas en humedales. Aplicación en el ámbito del Parque Natural de La Albufera de Valencia.
- Belda, E., 2013. Evaluación y propuesta de actuaciones para la mejora de la calidad del agua en el lago de La Albufera, Valencia. Universitat Politècnica València.
- Carpenter, S.R., 2005. Eutrophication of aquatic ecosystems: bistability and soil phosphorus. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 102, 10002–10005. doi:10.1073/pnas.0503959102
- CEE, 1992. Directiva 92/43/CEE Relativa a la conservación de los habitats naturales y de la fauna y flora silvestres.
- CEE, 1979. Directiva 79/409/CEE Relativa a la conservación de las aves silvestres.
- CGV, 1986. Decreto 89/1986, de 8 de julio, del Consell de la Generalitat



Valenciana, de régimen jurídico del Parque Natural de la Albufera.

Chapra, S.C., 2003. Engineering Water Quality Models and TMDLs. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 129, 247–256. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:4(247)

Chapra, S.C., 1997. *Surface Water-Quality Modeling*, McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. McGraw Hill.

del Barrio Fernández, P., Gómez, A.G., Alba, J.G., Díaz, C.Á., Revilla Cortezón, J.A., 2012. A model for describing the eutrophication in a heavily regulated coastal lagoon. Application to the Albufera of Valencia (Spain). *J. Environ. Manage.* 112, 340–352. doi:10.1016/j.jenvman.2012.08.019

Dortch, M.S., Gerald, J. a, 1995. *Screening-Level Model for Estimating Pollutant Removal by Wetlands*.

EC, 2000. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. *D. Of. Las Comunidades Eur.* 1–73.

Estrela, T., 1993. Estimación de parámetros de recarga y descarga en un modelo de flujo subterráneo de un manantial cárstico.

Fan, F.M., Fleischmann, A.S., Collischonn, W., Ames, D.P., Rigo, D., 2015. Large-scale analytical water quality model coupled with GIS for simulation of point sourced pollutant discharges. *Environ. Model. Softw.* 64, 58–71. doi:10.1016/j.envsoft.2014.11.012

Hernández-Crespo, C., Martín, M., 2015. Determination of background levels and pollution assessment for seven metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Fe, Mn) in sediments of a Mediterranean coastal lagoon. *Catena* 133, 206–214. doi:10.1016/j.catena.2015.05.013

Janus, L., Vollenweider, R., 1982. *The OECD Cooperative Programm on Eutrophication. Canadian contribution. Summary Report, Synthesis*.

Jeppesen, E., Søndergaard, M., Jensen, J.P., Havens, K.E., Anneville, O., Carvalho,



- L., Coveney, M.F., Deneke, R., Dokulil, M.T., Foy, B., Gerdeaux, D., Hampton, S.E., Hilt, S., Kangur, K., Köhler, J., Lammens, E.H.H.R., Lauridsen, T.L., Manca, M., Miracle, M.R., Moss, B., Nöges, P., Persson, G., Phillips, G., Portielje, R., Romo, S., Schelske, C.L., Straile, D., Tatrai, I., Willén, E., Winder, M., 2005. Lake responses to reduced nutrient loading - An analysis of contemporary long-term data from 35 case studies. *Freshw. Biol.* 50, 1747–1771. doi:10.1111/j.1365-2427.2005.01415.x
- Kadlec, R.H., Wallace, S.D., 2009. Treatment Wetlands, Second Edition, in: Treatment Wetlands, Second Edition. CRC Press, p. 965.
- Kim, S., Seo, D.-J., Riazi, H., Shin, C., 2014. Improving water quality forecasting via data assimilation – Application of maximum likelihood ensemble filter to HSPF. *J. Hydrol.* 519, 2797–2809. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.09.051
- LIFE ALBUFERA, 2013. ENV/ES/000685 [WWW Document]. URL <http://www.lifealbufera.org/index.php/es/> (accessed 11.26.15).
- LIFE12, 2013. Gestión integrada de tres humedales artificiales en cumplimiento de las Directivas Marco del Agua, Aves y Hábitats.
- Lund, J.R., 1996. Developing Seasonal and Long-Term Reservoir System Operation Plans Using HEC-PRM 1–2. doi:RD-40
- Lund, J.R., Guzman, J., 1999. Derived Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 125, 143–153. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:3(143)
- Lung, W.-S., Larson, C.E., 1995. Water Quality Modeling of Upper Mississippi River and Lake Pepin. *J. Environmental Eng.* 121, 691–699.
- MAGRAMA, 1991. Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Manual de interpretación y elaboración de informes.
- Martín, M., 1998. Modelación de la calidad en aguas superficiales. Aplicación al caso de la Albufera de Valencia. Universidad de Valencia.



- Martín, M., Gargallo, S., Hernández-Crespo, C., Oliver, N., 2013a. Phosphorus and nitrogen removal from tertiary treated urban wastewaters by a vertical flow constructed wetland. *Ecol. Eng.* 61, 34–42. doi:10.1016/j.ecoleng.2013.09.046
- Martín, M., Jurado, D., 2010. Environmental restoration of hypertrophic lakes by means of the treatment with artificial wetlands. Analysis of viability in the case of the Albufera of Valencia, Spain. *Environ.* 2010 1–7.
- Martín, M., Marzal, P., 1999. Modelación de la calidad del agua. Universitat Politècnica de València.
- Martín, M., Oliver, N., Hernández-Crespo, C., Gargallo, S., Regidor, M.C., 2013b. The use of free water surface constructed wetland to treat the eutrophicated waters of lake L'Albufera de Valencia (Spain). *Ecol. Eng.* 50, 52–61. doi:10.1016/j.ecoleng.2012.04.029
- McKay, M.D., Beckman, R.J., Conover, W.J., 1979. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics* 21, 239–245. doi:10.2307/1268522
- Miracle, García, Vicente., 1984. Heterogeneidad Espacial De Las Comunidades Fitoplanctonicas De La Albufera De Valencia. *Limnetica* 1, 20–31.
- MMA, 2010. La Situación actual y los Problemas Existentes y Previsibles., in: Libro Blanco Del Agua En España. pp. 195–412 (3B).
- Mondría, M., 2007. Infraestructuras y eutroficación en L'Albufera de València. El modelo CABHAL. Universitat Politècnica de València.
- Moreno, D., Quintero, J., Lopez, A., 2010. Metodos para identificar , diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS* 78 25–33.
- Ochoa, J.C., 2002. Modelo Estocástico de redes neuronales para la síntesis de caudales aplicados a la gestión probabilística de sequias. Universitat Politècnica de València.



- Onandia, G., Gudimov, A., Miracle, M.R., Arhonditsis, G., 2015. Towards the development of a biogeochemical model for addressing the eutrophication problems in the shallow hypertrophic lagoon of Albufera de Valencia, Spain. *Ecol. Inform.* 26, 70–89. doi:10.1016/j.ecoinf.2015.01.004
- Onandia, G., Miracle, M.R., Vicente, E., 2014. Primary production under hypertrophic conditions and its relationship with bacterial production. *Aquat. Ecol.* 48, 447–463. doi:10.1007/s10452-014-9497-9
- Paredes, J., 2004. Integración de la modelación de la calidad del agua en un sistema de ayuda a la decisión para la gestión de recursos hídricos. Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain). doi:10.4995/Thesis/10251/1895
- Paredes, J., Lund, J.R., 2006. Refill and drawdown rules for parallel reservoirs: Quantity and quality. *Water Resour. Manag.* 20, 359–376. doi:10.1007/s11269-006-0325-4
- Paredes, J., Solera, A.S., 2013. Modelo gescal para la simulación de la calidad del agua en sistemas de recursos hídricos.
- Pascual-Aguilar, J., Andreu, V., Gimeno-García, E., Picó, Y., 2015. Current anthropogenic pressures on agro-ecological protected coastal wetlands. *Sci. Total Environ.* 503-504, 190–9. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.07.007
- Rodrigo, M. a., Alonso-Guillén, J.L., 2013. Assessing the potential of Albufera de València Lagoon sediments for the restoration of charophyte meadows. *Ecol. Eng.* 60, 445–452. doi:10.1016/j.ecoleng.2013.09.041
- Rodrigo, M.A., Rojo, C., Alonso-Guillén, J.L., Vera, P., 2013. Restoration of two small Mediterranean lagoons: The dynamics of submerged macrophytes and factors that affect the success of revegetation. *Ecol. Eng.* 54, 1–15. doi:10.1016/j.ecoleng.2013.01.022
- Rodrigo, M.A., Rojo, C., Segura, M., Alonso-Guillén, J.L., Martín, M., Vera, P., 2015.



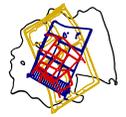
- The role of charophytes in a Mediterranean pond created for restoration purposes. *Aquat. Bot.* 120, 101–111. doi:10.1016/j.aquabot.2014.05.004
- Rosenbrock, H., 1960. An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *Comput. J.* 3, 175–184.
- Sigvaldson, O.T., 1976. A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system. *Water Resour. Res.* 12, 263. doi:10.1029/WR012i002p00263
- Smith, V.H., Schindler, D.W., 2009. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends Ecol. Evol.* 24, 201–7. doi:10.1016/j.tree.2008.11.009
- Solera, A., Paredes-arquiola, J., Andreu Álvarez, J., Pedro-Monzonís, M., 2014. *Aplicaciones de Sistemas Soporte a la Decisión en Planificación y Gestión Integradas de Cuencas Hidrográficas*. Marcombo.
- Soria, J.M., 2006. Past, present and future of la Albufera of Valencia Natural Park. *Limnetica* 25, 135–142.
- Streeter, H., Phelps, E., 1925. A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River. *Public Health Bulletin (Wash. D. C.)* 146, 1–69. doi:10.1002/ange.19290420217
- Thomann, R. V., Mueller, J.A., 1987. *Principles of surface water quality modeling and control*.
- Tornero, J., Armesto, L., 2007. *Técnicas de optimización*. Universitat Politècnica de València.
- TYPSA, 2004. *Estudio para el desarrollo sostenible de l'Albufera de Valencia*.
- Wu, H., Huang, P., Wang, J., Area, a S., 2010. Treatment of Eutrophic-lake Water by Free Water Surface Wetland 4, 996–999.
- Wu, W., Dandy, G.C., Maier, H.R., 2014. Protocol for developing ANN models and its application to the assessment of the quality of the ANN model



development process in drinking water quality modelling. *Environ. Model. Softw.* 54, 108–127. doi:10.1016/j.envsoft.2013.12.016

Zhou, S., Nakashimada, Y., Hosomi, M., 2009. Nitrogen transformations in vertical flow systems with and without rice (*Oryza sativa*) studied with a high-resolution soil–water profiler. *Ecol. Eng.* 35, 213–220. doi:10.1016/j.ecoleng.2008.04.014

Zouiten, H., 2012. Análisis mediante modelado avanzado de procesos de eutrofización en lagunas litorales: aplicación a masas de agua atlánticas y mediterráneas.



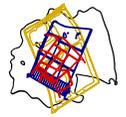
ANEJOS

Documento Técnico de ampliación y calibración del modelo Albufera



LIFE ALBUFERA (LIFE12 ENV/ES/000685)
Acción B3: Modelación de la calidad del agua

*Miguel Martín Monerris
Javier Paredes Arquiola
Edgar Belda Ibáñez*



A. Código HUMEDAL

{ANEJO A}

En este apartado se muestra el código del programa HUMEDAL para el cálculo de concentraciones en sistemas acuáticos someros.

```

Imports System.IO

'PROGRAMA ALBUFERA_LIFE: CALCULO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS SOMERAS EN HUMEDALES EN EL MARCO DEL PROYECTO
ALBUFERA LIFE
' Autor: Edgar Belda Ibáñez (Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos, Universidad Politécnica de Valencia)
' Autor: Javier Paredes Arquiola (Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos, Universidad Politécnica de Valencia)
' Autor: Miguel Martín Monerri (Grupo de Calidad de Aguas, Universidad Politécnica de Valencia)
' Fecha inicio: 01/02/2015; Fecha última modificación: 30/06/2015

'NOTAS IMPORTANTES
'SE ASUME QUE LOS ARCHIVOS DE CONCENTRACIONES, CAUDALES Y CURVAS TIENEN EL MISMO ORDEN
' Nombres de los archivos fijos: Control.inp; Batimetricas.inp; Caudales.inp; Concentraciones.inp;
Constantes.inp, Curvas.inp, ConcentracionesIniciales.inp
'Manejamos base cero pero la información empieza en 1

'PENDIENTES:
'Nuevos procesos

Module Albufera

#Region "Variables"

#Region "Control"
'Control
Public sw_co As StreamWriter
Public sr_co As StreamReader

Public desfaseTemporal As Long
Public numeroVariables As Long
Public numeroDiasSimular As Long
Public pasosTiempo As Long
Public nombreArchivo As String
Public fechaIni As Date

Public errorProducido As Boolean = False
Public sw_errores As StreamWriter
Public sw_resultados As StreamWriter

#End Region

#Region "Batimetricas"
'Batimetricas
Public sw_b As StreamWriter
Public sr_b As StreamReader

Public Volmenes(10) As Double
Public Cotas(10) As Double
Public Superficies(10) As Double

#End Region

#Region "Constantes"
'Constantes
Public sw_k As StreamWriter
Public sr_k As StreamReader

Public Ka As Double
Public T_Ka As Double
Public Kd As Double

```



```
Public T_Kd As Double
Public Vsd As Double
Public T_Vsd As Double
Public Knorg As Double
Public T_Knorg As Double
Public VSNorg As Double
Public T_VSNorg As Double
Public Kn As Double
Public T_Kn As Double
Public Kdesnit As Double
Public T_Kdesnit As Double
Public Kdeath As Double
Public T_Kdeath As Double
Public Vsfito As Double
Public T_Vsfito As Double
Public Kfosforg As Double
Public T_Kfosforg As Double
Public Vsfosforg As Double
Public T_Vsfosforg As Double
Public Isat As Double
Public Kb As Double
Public Katenp As Double
Public Kfosfa As Double
Public T_Kfosfa As Double
Public Kgrow As Double
Public T_Kgrow As Double
Public SOD As Double
Public SedNo3 As Double
Public SedPinorg As Double
Public SedNh4 As Double
Public Kd1_2 As Double
Public Kn1_2 As Double
Public Knf1_2 As Double
Public Kp1_2 As Double
Public kdn1_2 As Double
Public Ra As Double
Public Roresp As Double
Public Rocrec As Double
Public rna As Double
Public rpa As Double
Public FnAN As Double
Public Fp As Double
Public KcompAd As Double
Public KresP As Double
Public V_Sed_SS As Double

#End Region

#Region "Caudales"
' Caudales
Public sw_q As StreamWriter
Public sr_q As StreamReader

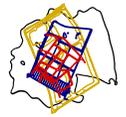
Dim MCaudales(3) As Double
#End Region

#Region "Concentraciones"
' Concentraciones
Public sw_c As StreamWriter
Public sr_c As StreamReader

Dim MConcentraciones(11) As Double
#End Region

#Region "ConcentracionesIniciales"
' Concentraciones
Public sw_coI As StreamWriter
Public sr_coI As StreamReader

Public V_ant As Double
Public C_O_t1 As Double
Public C_DBO_t1 As Double
Public C_Norg_t1 As Double
Public C_NH4_t1 As Double
Public C_NO3_t1 As Double
Public C_Chla_t1 As Double
Public C_Chla_Fito_t1 As Double
Public C_Forg_t1 As Double
Public C_Finorg_t1 As Double
Public C_Ftotal_t1 As Double
```



```

Public C_Fsed_t1 As Double
Public C_Si_t1 As Double
Public C_SS_t1 As Double
Public C_Cond_t1 As Double
Public C_Chla_diatomeas_t1 As Double

#End Region

#Region "Curvas"
'Curvas
Public sw_cu As StreamWriter
Public sr_cu As StreamReader

    Dim MCurvas(6) As Double
#End Region

#Region "VariablesHumedal"
'Variables
Public Variables As Dictionary(Of String, Double) = New Dictionary(Of String, Double)
Public V_t As Double
Public C_O As Double
Public C_DBO As Double
Public C_Norg As Double
Public C_NH4 As Double
Public C_NO3 As Double
Public C_Chla As Double
Public C_Chla_Fito As Double
Public C_Forg As Double
Public C_Finorg As Double
Public C_Ftotal As Double
Public V_PH As Double
Public C_Fsed As Double
Public Q_Salrealp As Double
Public C_Si As Double
Public C_SS As Double
Public C_Cond As Double
Public C_Chla_diatomeas As Double

#End Region

#End Region

Sub Main()

    'Inicializa archivo de error albufera.err
    CreaPrimeraLineaErr()

    If errorProducido Then
        Exit Sub
    End If

    'Comprobación de archivos de entrada:
    Comprueba_inp()

    If errorProducido Then
        Exit Sub
    End If

    'Leemos el archivo de control donde se definen parámetros básicos del modelo de calidad
    Lectura_control()

    If errorProducido Then
        Exit Sub
    End If

    'Leemos el archivo de batimetricas
    Lectura_Batimetricas()

    If errorProducido Then
        Exit Sub
    End If

    'Leemos el archivo de constantes

```



```
Lectura_Constantes()

If errorProducido Then
    Exit Sub
End If

Lectura_ConcentracionesIniciales()

If errorProducido Then
    Exit Sub
End If

'Lectura Caudal, Concentraciones y Curvas
Lectura_CCC()

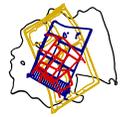
If errorProducido Then
    Exit Sub
End If

Dim K As Long, i As Long 'Para bucles

' Definir VARIABLES CALCULADAS Y PARÁMETROS EFECTIVOS

Dim Temp As Double
Dim OSat As Double
Dim IncreVol As Double
Dim AlturaTanque As Double
Dim Superficie As Double
Dim DOSv As Double
Dim SedNh4v As Double
Dim SedNo3v As Double
Dim SedPinorgv As Double
Dim Ka_T As Double
Dim Kd_T As Double
Dim Vsd_T As Double
Dim Knorg_T As Double
Dim VsNorg_T As Double
Dim Kn_T As Double
Dim Kdesnit_T As Double
Dim Kdeath_T As Double
Dim Vsfito_T As Double
Dim Kfosforg_T As Double
Dim VsFosforg_T As Double
Dim Kfosfa_T As Double
Dim Kgrow_T As Double
Dim kd1_2_0 As Double
Dim kn1_2_0 As Double
Dim knf1_2_N As Double
Dim kp1_2_P As Double
Dim kdn1_2_0 As Double
Dim LimNinorg As Double
Dim LimPinorg As Double
Dim LimSi As Double
Dim Fn As Double
Dim Fn2 As Double
Dim ke As Double
Dim Iz As Double
Dim F1 As Double
Dim Kgrow_TNL As Double
Dim Kgrow_TNL2 As Double
Dim Io As Double
Dim incrementodeT As Double

'Definición de Procesos
Dim P_Qe As Double
Dim P_Qs As Double
Dim P_vQ As Double
Dim P_Reaireacion As Double
Dim P_Degr_MO As Double
Dim P_DOS As Double
Dim P_Nitrificacion As Double
Dim P_CrecimientoFito As Double
Dim P_MuerteFito As Double
Dim P_Sed_MO As Double
Dim P_Amonificacion As Double
Dim P_Sed_Norg As Double
Dim P_Resus_NH4 As Double
Dim P_Desnitrificacion As Double
Dim P_Sed_NO3 As Double
```



```

Dim P_Sed_Chla As Double
Dim P_Mineralizacion As Double
Dim P_Sed_Porg As Double
Dim P_Adsorcion As Double
Dim P_Resuspension As Double
Dim P_Compactacion As Double
Dim P_Sed_SS As Double

'Concentraciones entrada
Dim C_O_e As Double
Dim C_DBO_e As Double
Dim C_Norg_e As Double
Dim C_NH4_e As Double
Dim C_NO3_e As Double
Dim C_Chla_e As Double
Dim C_Forg_e As Double
Dim C_Finorg_e As Double
Dim C_SS_e As Double
Dim C_Si_e As Double
Dim C_Cond_e As Double

'Caudales entrada
Dim Q_entr As Double
Dim Q_sal As Double
Dim Evap As Double
Dim VolMax As Double
Dim Sueltas As Double
Dim Deficit As Double
Dim Q_salReal As Double

incrementodeT = 1 / pasosTiempo

V_t = V_ant
Sueltas = 0
Deficit = 0
Q_salReal = 0

For i = 1 To numeroDiasSimular

    ' Asignar variables
    Temp = MCurvas(1)
    Io = MCurvas(6)

    'Concentraciones de entrada
    C_O_e = MConcentraciones(1)
    C_DBO_e = MConcentraciones(2)
    C_Norg_e = MConcentraciones(3)
    C_NH4_e = MConcentraciones(4)
    C_NO3_e = MConcentraciones(5)
    C_Chla_e = MConcentraciones(6)
    C_Forg_e = MConcentraciones(7)
    C_Finorg_e = MConcentraciones(8)
    C_Si_e = MConcentraciones(9)
    C_SS_e = MConcentraciones(10)
    C_Cond_e = MConcentraciones(11)

    'Caudales
    Superficie = Interpolacion(Volumenes, Superficies, V_t)
    Q_entr = MCaudales(1)
    Evap = MCaudales(3) * Superficie / 100000
    If i = 1 Then
        Q_sal = Q_entr
    Else
        Q_sal = Q_salReal
    End If

    Q_salReal = 0

    VolMax = MCaudales(2)

    OSat = -139.34411 + 157570.1 / (Temp + 273.15) - 66423080 / (Temp + 273.15) ^ 2 + 12438000000.0# /
(Temp + 273.15) ^ 3 - 806219490000.0# / (Temp + 273.15) ^ 4

    AlturaTanque = Interpolacion(Volumenes, Cotas, V_t)

    'Sedimento

```



```
DOSv = SOD * MCurvas(2)
SedNh4v = SedNh4 * MCurvas(3)
SedNo3v = SedNo3 * MCurvas(4)
SedPinorgv = SedPinorg * MCurvas(5)

'Correccion por temperatura
Ka_T = Ka * (T_Ka ^ (Temp - 20))
Kd_T = Kd * (T_Kd ^ (Temp - 20))
Vsd_T = Vsd * (T_Vsd ^ (Temp - 20))
Knorg_T = Knorg * (T_Knorg ^ (Temp - 20))
VsNorg_T = VsNorg * (T_VsNorg ^ (Temp - 20))
Kn_T = Kn * (T_Kn ^ (Temp - 20))
Kdesnit_T = Kdesnit * (T_Kdesnit ^ (Temp - 20))
Kdeath_T = Kdeath * (T_Kdeath ^ (Temp - 20))
Vsfito_T = Vsfito * (T_Vsfito ^ (Temp - 20))
Kfosforg_T = Kfosforg * (T_Kfosforg ^ (Temp - 20))
VsFosforg_T = VsFosforg * (T_VsFosforg ^ (Temp - 20))
Kfosfa_T = Kfosfa * (T_Kfosfa ^ (Temp - 20))
Kgrow_T = Kgrow * (T_Kgrow ^ (Temp - 20))
Q_salReal = 0

For K = 1 To pasosTiempo

    kd1_2_0 = Kd_T * C_O_t1 / (C_O_t1 + Kd1_2)
    kn1_2_0 = Kn_T * C_O_t1 / (C_O_t1 + Kn1_2)
    knf1_2_N = Kgrow_T * (C_NH4_t1 + C_NO3_t1 + C_Norg_t1) / ((C_NH4_t1 + C_NO3_t1 + C_Norg_t1) +
Knf1_2)

    kp1_2_P = Kgrow_T * C_Ftotal_t1 / (C_Ftotal_t1 + Kp1_2)
    kdn1_2 = Kdesnit_T * kdn1_2 / (kdn1_2 + C_O_t1)
    LimNinorg = (C_NO3_t1 + C_NH4_t1) / (C_NO3_t1 + C_NH4_t1 + Knf1_2)
    LimPinorg = (C_Finorg_t1) / (C_Finorg_t1 + Kp1_2)
    LimSi = (C_Si_t1) / (C_Si_t1 + 0.03)
    Fn = LimNinorg * LimPinorg
    Fn2 = LimNinorg * LimPinorg * LimSi
    ke = Kb + 0.0088 * C_Chla_t1 + 0.054 * C_Chla_t1 ^ (2 / 3)
    Iz = Io / 0.5 * (0.457)
    F1 = 2.718 * 0.5 / (ke * AlturaTanque) * (Math.Exp(-(Iz / Isat) * Math.Exp(-ke * AlturaTanque))
- Math.Exp(-Iz / Isat))
    Kgrow_TNL = Kgrow_T * Fn * F1
    Kgrow_TNL2 = Kgrow_T * Fn2 * F1

    If (V_t + Q_entr - Q_sal) < VolMax Then
        Deficit = (VolMax - V_t - Q_entr + Q_sal) / (pasosTiempo / 500)
        Seltas = 0
        If Deficit > Q_sal Then
            Deficit = Q_sal
        End If
    ElseIf (V_t + Q_entr - Q_sal) > VolMax Then
        Seltas = (V_t + Q_entr - Q_sal - VolMax) / (pasosTiempo / 500)
        Deficit = 0
    Else
        Seltas = 0
        Deficit = 0
    End If

    Q_salReal = Q_salReal + incrementodeT * (Q_sal + Seltas - Deficit)

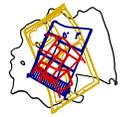
    V_t = V_ant + incrementodeT * (Q_entr - Q_sal - Evap - Seltas + Deficit)

    IncreVol = V_t - V_ant

    P_Qe = Q_entr / ((V_t + V_ant) / 2)
    P_Qs = (Q_sal + Seltas - Deficit) / ((V_t + V_ant) / 2)
    P_vQ = IncreVol / incrementodeT / ((V_t + V_ant) / 2)

    'Cálculo del Oxígeno Disuelto
    'Procesos (Todos con signo positivo)
    P_Degr_MO = kd1_2_0 * C_DBO_t1
    P_Reaireacion = Ka_T * (OSat - C_O_t1)
    P_DOS = DOSv / AlturaTanque
    P_Nitrificacion = kn1_2_0 * C_NH4_t1
    P_CrecimientoFito = Kgrow_TNL * C_Chla_t1 / 1000
    P_MuerteFito = Kdeath_T * C_Chla_t1 / 1000

    C_O = C_O_t1 + incrementodeT * (C_O_e * P_Qe - C_O_t1 * P_Qs - C_O_t1 * P_vQ - P_Degr_MO +
P_Reaireacion - Ra * Kn_T * C_NH4_t1 + Rocrec * P_CrecimientoFito - Roresp * P_MuerteFito + P_DOS)
```



```

If C_O < 0.0001 Then
    C_O = 0.0001
End If

'Cálculo de la Materia Orgánica Carbonosa
P_Sed_MO = (Vsd_T / AlturaTanque) * C_DBO_t1

C_DBO = C_DBO_t1 + incrementodeT * (C_DBO_e * P_Qe - C_DBO_t1 * P_Qs - C_DBO_t1 * P_vQ -
P_Degr_MO - P_Sed_MO)

'Cálculo del Nitrogeno Organico
P_Amonificacion = Knorg_T * C_Norg_t1
P_Sed_Norg = (VsNorg_T / AlturaTanque) * C_Norg_t1

C_Norg = C_Norg_t1 + incrementodeT * (C_Norg_e * P_Qe - C_Norg_t1 * P_Qs - C_Norg_t1 * P_vQ -
P_Amonificacion - P_Sed_Norg + rna * P_MuerteFito)

'Calculo del Amonio
P_Resus_NH4 = SedNH4v / AlturaTanque
C_NH4 = C_NH4_t1 + incrementodeT * (C_NH4_e * P_Qe - C_NH4_t1 * P_Qs - C_NH4_t1 * P_vQ +
P_Amonificacion - P_Nitrificacion - rna * FnAN * P_CrecimientoFito + P_Resus_NH4)

If C_NH4 < 0.0001 Then
    C_NH4 = 0
End If

'Cálculo del Nitrato
P_Desnitrificacion = kdn1_2_0 * C_NO3_t1
P_Sed_NO3 = SedNo3v / AlturaTanque

C_NO3 = C_NO3_t1 + incrementodeT * (C_NO3_e * P_Qe - C_NO3_t1 * P_Qs - C_NO3_t1 * P_vQ +
P_Nitrificacion - P_Desnitrificacion - rna * (1 - FnAN) * P_CrecimientoFito + P_Sed_NO3)

If C_NO3 < 0.0001 Then
    C_NO3 = 0
End If

'Cálculo de la Clorofila-a
P_Sed_Chla = (Vsfito_T / AlturaTanque) * C_Chla_t1

C_Chla_Fito = C_Chla_Fito_t1 + incrementodeT * (Pfito * C_Chla_e * P_Qe - C_Chla_Fito_t1 * P_Qs
- C_Chla_Fito_t1 * P_vQ + P_CrecimientoFito * 1000 - Kdeath_T * C_Chla_Fito_t1 - (Vsfito_T / AlturaTanque) *
C_Chla_Fito_t1)
If C_Chla_Fito < 0.0001 Then
    C_Chla_Fito = 0
End If
C_Chla_diatomeas = C_Chla_diatomeas_t1 + incrementodeT * (Pdiatomeas * C_Chla_e * P_Qe -
C_Chla_diatomeas_t1 * P_Qs - C_Chla_diatomeas_t1 * P_vQ + Kgrow_TNL2 * C_Chla_t1 - Kdeath_T * C_Chla_diatomeas_t1
- (Vsfito_T * 1.5 / AlturaTanque) * C_Chla_diatomeas_t1)
If C_Chla_diatomeas < 0.0001 Then
    C_Chla_diatomeas = 0
End If
C_Chla = C_Chla_Fito + C_Chla_diatomeas

'Cálculo del Fósforo
P_Mineralizacion = Kfosforg_T * C_Forg_t1
P_Sed_Porg = VsFosforg_T / AlturaTanque * C_Forg_t1

C_Forg = C_Forg + incrementodeT * (C_Forg_e * P_Qe - C_Forg_t1 * P_Qs - C_Forg_t1 * P_vQ -
P_Mineralizacion + Fp * rpa * P_MuerteFito - P_Sed_Porg)

P_Adsorcion = Kfosfa_T * C_Finorg_t1
P_Resuspension = SedPinorgv * C_Fsed_t1 / KresP / AlturaTanque

C_Finorg = C_Finorg_t1 + incrementodeT * (C_Finorg_e * P_Qe - C_Finorg_t1 * P_Qs - C_Finorg_t1
* P_vQ - P_Adsorcion + P_Mineralizacion - rpa * P_CrecimientoFito + (1 - Fp) * rpa * P_MuerteFito + P_Resuspension)
C_Ftotal = C_Finorg + C_Forg + C_Chla / 1000

'Calculo de fósforo en el sedimento
P_Compactacion = KcompAd * C_Fsed_t1
C_Fsed = C_Fsed_t1 + V_t * incrementodeT * (P_Adsorcion - P_Resuspension + P_Sed_Porg +
P_Sed_Chla / 1000 - P_Compactacion)

'Calculo de la Conductividad
C_Cond = C_Cond_t1 + incrementodeT * (C_Cond_e * P_Qe - C_Cond_t1 * P_Qs - C_Cond_t1 * P_vQ)

'Calculo de Solidos Suspendidos
P_Sed_SS = V_Sed_SS * C_SS_t1

```



```
C_SS = C_SS_t1 + incrementodeT * (C_SS_e * P_Qe - C_SS_t1 * P_Qs - C_SS_t1 * P_vQ - P_Sed_SS)

'Calculo del silicio
C_Si = C_Si_t1 + incrementodeT * (C_Si_e * P_Qe - C_Si_t1 * P_Qs - C_Si_t1 * P_vQ + 50 * Kdeath_T
* C_Chla_diatomeas_t1 / 1000 - 50 * Kgrow_TNL2 * C_Chla_diatomeas_t1 / 1000)
```

```
V_ant = V_t
C_O_t1 = C_O
C_DBO_t1 = C_DBO
C_Norg_t1 = C_Norg
C_NH4_t1 = C_NH4
C_NO3_t1 = C_NO3
C_Chla_t1 = C_Chla
C_Forg_t1 = C_Forg
C_Finorg_t1 = C_Finorg
C_Fsed_t1 = C_Fsed
C_Si_t1 = C_Si
C_SS_t1 = C_SS
C_Cond_t1 = C_Cond
C_Chla_Fito_t1 = C_Chla_Fito
C_Chla_diatomeas_t1 = C_Chla_diatomeas
```

Next K

```
'Escribe los resultados que queremos
introduceValor("V_ant", V_t)
introduceValor("C_O_t1", C_O)
introduceValor("C_DBO_t1", C_DBO)
introduceValor("C_Norg_t1", C_Norg)
introduceValor("C_NH4_t1", C_NH4)
introduceValor("C_NO3_t1", C_NO3)
introduceValor("C_Chla_t1", C_Chla)
introduceValor("C_Forg_t1", C_Forg + C_Chla / 1000)
introduceValor("C_Finorg_t1", C_Finorg)
introduceValor("C_Ftotal", C_Ftotal)
introduceValor("V_PH", pH(C_Chla, C_O, Temp))
introduceValor("C_Fsed_t1", C_Fsed)
introduceValor("Q_Salrealp", Q_salReal)
introduceValor("C_Si", C_Si)
introduceValor("C_SS", C_SS)
introduceValor("C_Cond", C_Cond)
introduceValor("FlimitaLuz", Fl)
introduceValor("FlimitaNutrientes", Fn)
introduceValor("FlimitaNitrogeno", LimNinorg)
introduceValor("FlimitaFosforo", LimPinorg)
introduceValor("sedFito", P_Sed_Chla)
introduceValor("C_Chla_diatomeas", C_Chla_diatomeas)
introduceValor("C_Chla_fito", C_Chla_Fito)
introduceValor("FlimitaSilicio", LimSi)
```

```
-----
If i > 1 Then
    EscribeResultadosDic()
Else
    CreaPrimeraResultados()
    EscribeResultadosDic()
End If

Lectura_CCC2()
fechaIni = fechaIni.AddDays(1)

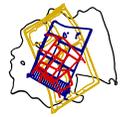
If errorProducido Then
    Exit Sub
End If
```

Next i

Cierre_FIN_Archivos()

End Sub

#Region "SUBRUTINAS"



```

Sub Comprueba_inp()

If File.Exists("Caudales.inp") Then
    sr_q = New StreamReader("Caudales.inp")
Else
    sw_errores.WriteLine("No se encuentra el archivo Caudales.inp")
    sw_errores.Close()
    errorProducido = True
End If
If File.Exists("Concentraciones.inp") Then
    sr_c = New StreamReader("Concentraciones.inp")
Else
    sw_errores.WriteLine("No se encuentra el archivo Concentraciones.inp")
    sw_errores.Close()
    errorProducido = True
End If
If File.Exists("ConcentracionesIniciales.inp") Then
    sr_c = New StreamReader("Concentraciones.inp")
Else
    sw_errores.WriteLine("No se encuentra el archivo ConcentracionesIniciales.inp")
    sw_errores.Close()
    errorProducido = True
End If
If File.Exists("Curvas.inp") Then
    sr_cu = New StreamReader("Curvas.inp")
Else
    sw_errores.WriteLine("No se encuentra el archivo Curvas.inp")
    sw_errores.Close()
    errorProducido = True
End If
If Not File.Exists("Batimetricas.inp") Then
    sw_errores.WriteLine("No se encuentra el archivo Batimetricas.inp")
    sw_errores.Close()
    errorProducido = True
End If

End Sub

Sub Cierra_Archivos()
    sr_q.Close()
    sr_co.Close()
    sr_cu.Close()
    sr_c.Close()
    sw_errores.Close()
    sw_resultados.Close()

    errorProducido = True

End Sub

Sub Cierre_FIN_Archivos()
    sr_q.Close()
    sr_co.Close()
    sr_cu.Close()
    sr_c.Close()
    sw_resultados.Close()

    sw_errores.WriteLine("Fin del proceso: " & System.DateTime.Now.ToString)
    sw_errores.WriteLine("Calculos realizados Correctamente")
    sw_errores.WriteLine("-----")
    sw_errores.Close()

End Sub

#End Region

#Region "LECTURAS"
Sub Lectura_control()
    'Leemos el archivo de control donde se definen parámetros básicos del modelo de calidad

    If File.Exists("Control.inp") Then
        sr_co = New StreamReader("Control.inp")
    Else
        sw_errores.WriteLine("No se encuentra el archivo Control.inp")
        sw_errores.Close()
    End If
End Sub

```



```
Exit Sub
End If

Try
    Dim sLine As String = ""
    sLine = sr_co.ReadLine() 'Leemos etiqueta
    sLine = sr_co.ReadLine()
    desfaseTemporal = CLng(sLine)
    sLine = sr_co.ReadLine() 'Leemos etiqueta
    sLine = sr_co.ReadLine()
    numeroVariables = CLng(sLine)
    sLine = sr_co.ReadLine() 'Leemos etiqueta
    sLine = sr_co.ReadLine()
    numeroDiasSimular = CLng(sLine)
    sLine = sr_co.ReadLine() 'Leemos etiqueta
    sLine = sr_co.ReadLine()
    pasosTiempo = CLng(sLine)
    sLine = sr_co.ReadLine() 'Leemos etiqueta
    sLine = sr_co.ReadLine()
    nombreArchivo = CStr(sLine)
    sLine = sr_co.ReadLine() 'Leemos etiqueta
    sLine = sr_co.ReadLine()
    fechaIni = CStr(sLine)
    sr_co.Close()
    'Fin lectura del archivo de control
Catch ex As Exception
    sw_errores.WriteLine("Error en la lectura del archivo Control.inp")
    Cierra_Archivos()
End Try
End Sub

Sub Lectura_ConcentracionesIniciales()
    If File.Exists("ConcentracionesIniciales.inp") Then
        sr_coI = New StreamReader("ConcentracionesIniciales.inp")
    Else
        sw_errores.WriteLine("No se encuentra el archivo ConcentracionesIniciales.inp")
        sw_errores.Close()
        Exit Sub
    End If

    Try
        Dim sLine As String = ""
        sLine = sr_coI.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_coI.ReadLine()
        V_ant = CDbI(sLine)

        sLine = sr_coI.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_coI.ReadLine()
        C_0_t1 = CDbI(sLine)

        sLine = sr_coI.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_coI.ReadLine()
        C_DBO_t1 = CDbI(sLine)

        sLine = sr_coI.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_coI.ReadLine()
        C_Norg_t1 = CDbI(sLine)

        sLine = sr_coI.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_coI.ReadLine()
        C_NH4_t1 = CDbI(sLine)

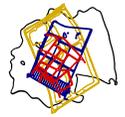
        sLine = sr_coI.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_coI.ReadLine()
        C_NO3_t1 = CDbI(sLine)

        sLine = sr_coI.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_coI.ReadLine()
        C_Chla_t1 = CDbI(sLine)

        C_Chla_diatomeas_t1 = Pdiatomeas * C_Chla_t1
        C_Chla_Fito_t1 = Pfito * C_Chla_t1

        sLine = sr_coI.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_coI.ReadLine()
        C_Forg_t1 = CDbI(sLine)

        sLine = sr_coI.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_coI.ReadLine()
    End Try
End Sub
```



```

C_Finorg_t1 = CDb1(sLine)

sLine = sr_coI.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_coI.ReadLine()
C_Ftotal_t1 = CDb1(sLine)

sLine = sr_coI.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_coI.ReadLine()
C_Fsed_t1 = CDb1(sLine)

sLine = sr_coI.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_coI.ReadLine()
C_Si_t1 = CDb1(sLine)

sLine = sr_coI.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_coI.ReadLine()
C_SS_t1 = CDb1(sLine)

sLine = sr_coI.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_coI.ReadLine()
C_Cond_t1 = CDb1(sLine)

sr_coI.Close()
'Fin lectura del archivo de control
Catch ex As Exception
sw_errores.WriteLine("Error en la lectura del archivo de ConcentracionesIniciales.inp")
Cierra_Archivos()
End Try

End Sub

Sub Lectura_Batimetricas()
Dim i As Long
Dim sVector() As String
'Leemos las curvas batimetricas

If File.Exists("Batimetricas.inp") Then
sr_b = New StreamReader("Batimetricas.inp")
Else
sw_errores.WriteLine("No se encuentra el archivo Batimetricas.inp")
sw_errores.Close()
Exit Sub
End If

Try
Dim sLine As String = ""
'Leemos Volúmenes
sLine = sr_b.ReadLine()
If Not sLine Is Nothing Then
sVector = sLine.Split(vbTab)
For i = 1 To 10
Volumenes(i) = CDb1(sVector(i - 1))
Next
End If

'Leemos Cotas
sLine = sr_b.ReadLine()
If Not sLine Is Nothing Then
sVector = sLine.Split(vbTab)
For i = 1 To 10
Cotas(i) = CDb1(sVector(i - 1))
Next
End If

'Leemos Superficies
sLine = sr_b.ReadLine()
If Not sLine Is Nothing Then
sVector = sLine.Split(vbTab)
For i = 1 To 10
Superficies(i) = CDb1(sVector(i - 1))
Next
End If

sr_b.Close()
'Fin lectura del archivo de control

```



```
Catch ex As Exception
    sw_errores.WriteLine("Error en la lectura del archivo de Batimetricas.inp")
    Cierra_Archivos()
End Try
End Sub

Sub Lectura_Constantes()

    'Leemos las constantes del modelo de calidad

    If File.Exists("Constantes.inp") Then
        sr_k = New StreamReader("Constantes.inp")
    Else
        sw_errores.WriteLine("No se encuentra el archivo Constantes.inp")
        sw_errores.Close()
        Exit Sub
    End If

    Try

        Dim sLine As String = ""
        sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_k.ReadLine()
        Ka = CDb1(sLine)

        sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_k.ReadLine()
        T_Ka = CDb1(sLine)

        sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_k.ReadLine()
        Kd = CDb1(sLine)

        sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_k.ReadLine()
        T_Kd = CDb1(sLine)

        sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_k.ReadLine()
        Vsd = CDb1(sLine)

        sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_k.ReadLine()
        T_Vsd = CDb1(sLine)

        sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_k.ReadLine()
        Knorg = CDb1(sLine)

        sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_k.ReadLine()
        T_Knorg = CDb1(sLine)

        sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_k.ReadLine()
        VsNorg = CDb1(sLine)

        sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_k.ReadLine()
        T_VsNorg = CDb1(sLine)

        sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_k.ReadLine()
        Kn = CDb1(sLine)

        sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_k.ReadLine()
        T_Kn = CDb1(sLine)

        sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_k.ReadLine()
        Kdesnit = CDb1(sLine)

        sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_k.ReadLine()
        T_Kdesnit = CDb1(sLine)

        sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
        sLine = sr_k.ReadLine()
        Kdeath = CDb1(sLine)

    End Try

End Sub
```



```
sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
T_Kdeath = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
Vsfito = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
T_Vsfito = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
Kfosforg = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
T_Kfosforg = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
VsFosforg = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
T_VsFosforg = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
Isat = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
Kb = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
Katenp = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
Kfosfa = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
T_Kfosfa = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
Kgrow = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
T_Kgrow = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
SOD = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
SedNo3 = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
SedPinorg = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
SedNh4 = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
Kd1_2 = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
Kn1_2 = CDb1(sLine)
```



```
sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
Knf1_2 = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
Kp1_2 = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
kdn1_2 = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
Ra = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
Roresp = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
Rocrec = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
rna = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
rpa = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
FnAN = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
Fp = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
KcompAd = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
KresP = CDb1(sLine)

sLine = sr_k.ReadLine() 'Leemos etiqueta
sLine = sr_k.ReadLine()
V_Sed_SS = CDb1(sLine)

sr_k.Close()
'Fin lectura del archivo de control
Catch ex As Exception
sw_errores.WriteLine("Error en la lectura del archivo Constantes.inp")
Cierra_Archivos()
End Try
End Sub

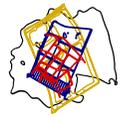
Sub Lectura_CCC()

Dim i As Long
Dim sVector() As String
'Leemos Caudales, Concentraciones y Curvas

Try
Dim sLine As String = ""
'Leemos Caudales
sLine = sr_q.ReadLine()

For i = 1 To desfaseTemporal
sLine = sr_q.ReadLine()
Next

If Not sLine Is Nothing Then
sVector = sLine.Split(vbTab)
```



```

        For i = 1 To 3
            MCaudales(i) = CDb1(sVector(i - 1))
        Next
    End If

Catch ex As Exception
    sw_errores.WriteLine("Error en la lectura del archivo de Caudales.inp")
    Cierra_Archivos()
End Try

Try
    Dim sLine As String = ""
    'Leemos Concentraciones
    sLine = sr_c.ReadLine()
    sLine = sr_c.ReadLine()

    For i = 1 To desfaseTemporal
        sLine = sr_c.ReadLine()
    Next

    If Not sLine Is Nothing Then
        sVector = sLine.Split(vbTab)

        For i = 1 To 11
            MConcentraciones(i) = CDb1(sVector(i))
        Next
    End If

Catch ex As Exception
    sw_errores.WriteLine("Error en la lectura del archivo de Concentraciones.inp")
    Cierra_Archivos()
End Try

Try
    Dim sLine As String = ""
    'Leemos Curvas
    sLine = sr_cu.ReadLine()

    For i = 1 To desfaseTemporal
        sLine = sr_cu.ReadLine()
    Next

    If Not sLine Is Nothing Then
        sVector = sLine.Split(vbTab)
        For i = 1 To 6
            MCurvas(i) = CDb1(sVector(i - 1))
        Next
    End If

Catch ex As Exception
    sw_errores.WriteLine("Error en la lectura del archivo de Curvas.inp")
    Cierra_Archivos()
End Try

End Sub

Sub Lectura_CCC2()
    Dim i As Long
    Dim sVector() As String
    'Leemos Caudales, Concentraciones y Curvas

    Try
        Dim sLine As String = ""
        'Leemos Caudales
        sLine = sr_q.ReadLine()

        If Not sLine Is Nothing Then
            sVector = sLine.Split(vbTab)
            For i = 1 To 3
                MCaudales(i) = CDb1(sVector(i - 1))
            Next
        End If

    Catch ex As Exception
        sw_errores.WriteLine("Error en la lectura del archivo de Caudales.inp")
        Cierra_Archivos()
    End Try

    Try
        Dim sLine As String = ""

```



```
'Leemos Concentraciones
sLine = sr_c.ReadLine()

If Not sLine Is Nothing Then
    sVector = sLine.Split(vbTab)
    For i = 1 To 11
        MConcentraciones(i) = Cdbl(sVector(i))
    Next
End If

Catch ex As Exception
    sw_errores.WriteLine("Error en la lectura del archivo de Concentraciones.inp")
    Cierra_Archivos()
End Try

Try
    Dim sLine As String = ""
    'Leemos Curvas
    sLine = sr_cu.ReadLine()

    If Not sLine Is Nothing Then
        sVector = sLine.Split(vbTab)
        For i = 1 To 6
            MCurvas(i) = Cdbl(sVector(i - 1))
        Next
    End If

Catch ex As Exception
    sw_errores.WriteLine("Error en la lectura del archivo de Curvas.inp")
    Cierra_Archivos()
End Try
End Sub

#End Region

#Region "EscrituraErr"

Sub CreaPrimeraLineaErr()
    sw_errores = New StreamWriter("albufera.err", True)
    sw_errores.WriteLine("-----")
    sw_errores.WriteLine("Inicio del proceso: " & System.DateTime.Now.ToString())
End Sub

#End Region

#Region "EscrituraResultados"

Sub CreaPrimeraResultados()
    sw_resultados = New StreamWriter(nombreArchivo)
    Dim cadena As String = "Fechas;"
    For Each valor As String In Variables.Keys
        cadena = cadena & valor & ";"
    Next
    sw_resultados.WriteLine(cadena)

End Sub

Sub EscriberResultadosDic()
    Dim cadena As String = fechaIni & ";"

    For Each valor As Double In Variables.Values
        cadena = cadena & valor & ";"
    Next
    sw_resultados.WriteLine(cadena)
End Sub

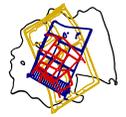
#End Region

#Region "FUNCIONES"

Function MinimoEntre2(valor1 As Double, valor2 As Double) As Double

    If valor1 > valor2 Then
        MinimoEntre2 = valor2
    Else
        MinimoEntre2 = valor1
    End If

End If
```



```

End Function

Function Interpolacion(Volumen() As Double, Cota() As Double, VolInt As Double)
'Se asume que el volumen está ordenado de menor a mayor
'Si el volumen es inferior al primer valor la función devuelve el primer valor
'Si el volumen introducido es superior al máximo valor la función devuelve el último valor
Dim NumValores As Integer
Dim i As Integer

Interpolacion = 0

NumValores = UBound(Volumen)
Select Case VolInt
Case Is <= Volumen(1)
Interpolacion = Cota(1)
Case Is >= Volumen(NumValores)
Interpolacion = Cota(NumValores)
Case Else
For i = 1 To NumValores
If VolInt <= Volumen(i) Then
Interpolacion = Cota(i - 1) + (VolInt - Volumen(i - 1)) * (Cota(i) - Cota(i - 1)) /
(Volumen(i) - Volumen(i - 1))
Exit For
End If
Next i
End Select
End Function

Function pH(Ch1a As Double, OD As Double, T As Double)

Dim Inputs() As Double
Dim Pesos2() As Double
Dim Pesos1(,) As Double
Dim aux As Double
Dim NumInputs As Long, NumNodos As Long
Dim i As Long, j As Long

NumInputs = 3      ' 3 INPUTS
NumNodos = 5      ' 8 NODOS

Dim aux2() As Double
ReDim aux2(NumNodos)
ReDim Inputs(3)
ReDim Pesos1(4, 5)
ReDim Pesos2(6)

'Homogenizamos INPUTS
Inputs(1) = (Ch1a - 3.34) / 696.7
Inputs(2) = (OD - 5) / 15
Inputs(3) = ((31 - T)) / 30

'Escribimos los pesos
-----
Pesos1(1, 1) = -0.65
Pesos1(1, 2) = -2.62
Pesos1(1, 3) = -1.89
Pesos1(1, 4) = -3.49
Pesos1(1, 5) = -5.21

Pesos1(2, 1) = 2.08
Pesos1(2, 2) = 2.47
Pesos1(2, 3) = 5.65
Pesos1(2, 4) = -2.87
Pesos1(2, 5) = 0.39

Pesos1(3, 1) = 3.35
Pesos1(3, 2) = -0.94
Pesos1(3, 3) = 1.85
Pesos1(3, 4) = -3.26
Pesos1(3, 5) = -2.89

Pesos1(4, 1) = 2.32
Pesos1(4, 2) = 6.53
Pesos1(4, 3) = -1.9
Pesos1(4, 4) = -2.89
Pesos1(4, 5) = -2.18

```



```
Pesos2(1) = 3.32
Pesos2(2) = -5.22
Pesos2(3) = 0.39
Pesos2(4) = -2.92
Pesos2(5) = 5.46
Pesos2(6) = 4.95

For i = 1 To NumNodos
  For j = 1 To NumInputs
    aux2(i) = aux2(i) + Inputs(j) * Pesos1(j, i)

  Next j
  aux2(i) = aux2(i) + Pesos1(j, i)
  aux2(i) = TangenteHyper(aux2(i))

Next i

For i = 1 To NumNodos
  aux = aux + aux2(i) * Pesos2(i)

Next i
aux = aux + Pesos2(i)

aux = TangenteHyper(aux) 'Tangente Hiperbololica

aux = aux * (1.75) + 7.17

pH = aux

End Function

Function TangenteHyper(ByVal valor As Double)
  TangenteHyper = (Math.Exp(valor) - Math.Exp(-valor)) / (Math.Exp(valor) + Math.Exp(-valor))

End Function

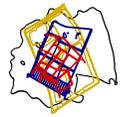
#End Region

#Region "METODOS"

Sub introduceValor(ByVal key As String, ByVal valor As Double)
  If Variables.ContainsKey(key) Then
    Variables.Item(key) = valor
  Else
    Variables.Add(key, valor)
  End If
End Sub

#End Region

End Module
```



B. Archivos HUMEDAL

La herramienta necesita que se generen unos archivos que servirán como series de entrada para el cálculo de las concentraciones de los contaminantes modelados. En la siguiente figura se muestran los archivos necesarios para el cálculo, y el formato de los resultados. Para la correcta escritura de los archivos de entrada (*.inp de la palabra inglesa *input*) se utilizará una hoja Excel con el nombre de humedal.xlsm en la que se habilitarán las macros para poder generar los archivos. Esta hoja genera los siguientes archivos: Batimetricas.inp, Caudales.inp, Concentraciones.inp, ConcentracionesIniciales.inp, Constantes.inp, Control.inp y Curvas.inp.

Una vez generados y ejecutado el programa Humedal.exe se obtendrán tres archivos como resultado de la simulación. El más importante es el de Resultados.csv en el que se recopilaran las concentraciones de cada contaminante modelado. También se genera un archivo de Fechas.out que permite una correcta representación temporal de los resultados. Y finalmente un archivo de Resultados.err en el que se podrá comprobar si la simulación se ha realizado correctamente, y en el caso que no fuera así, se podría comprobar en este archivo en que parte del cálculo se ha producido el error.

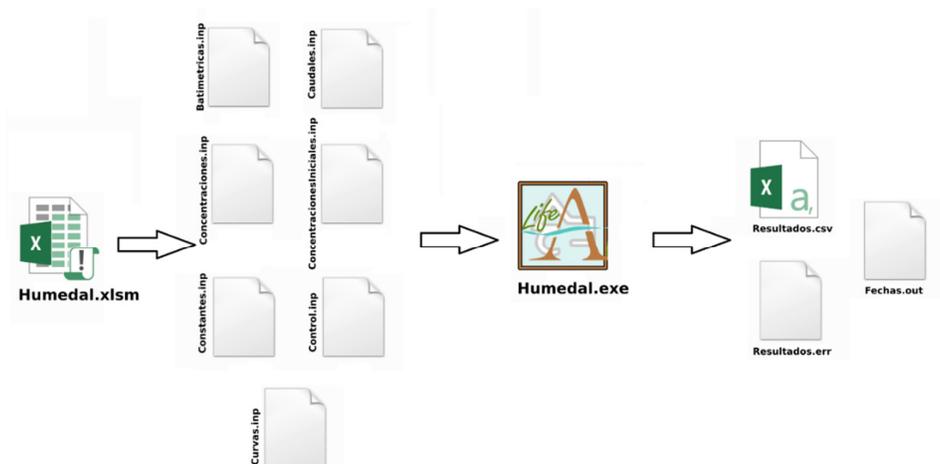


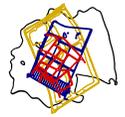
Ilustración (Anejos) 1. Entradas y salidas de la herramienta HUMEDAL.



Los resultados de salida se escriben en un archivo con extensión *.csv. En la misma hoja Excel en la que se cargan los datos para generar los archivos de entrada se puede modificar el nombre del archivo de salida. Las unidades de los resultados corresponden con las introducidas en el apartado de Concentraciones iniciales y, de entrada.

Con unas pequeñas modificaciones en el código, adjunto en el {ANEJO A}, se puede especificar el orden de los resultados y también incorporar la escritura de variables internas de cálculo.

Además, para comprobar que la simulación se ha realizado con éxito se genera un archivo con extensión *.err en el que se escribe la fecha de inicio de la simulación y si todo ha ido bien la fecha fin. Si se ha producido algún error en tiempo de simulación, se puede comprobar en qué parte del proceso ha sido mediante la inspección de este archivo.



C. Código HLR

{ANEJO C}

El código del algoritmo HLR está programado en VBA

```

Option Base 1      'Vectores y matrices empiezan con el índice 1.
Option Explicit    'Todas las variables deben estar definidas.

'HipercuboLatino
Dim ParametrosMin() As Double      'Mejor conjunto de parametros que maximizan la función objetivo.
Dim ParametrosMax() As Double      'Mejor conjunto de parámetros antes de realizar un cambio de ejes.
Dim seed As Double                  'Semilla
Dim DimHCL As Double                'Dimensión del Hipercubo

'Comun
Dim n As Long                       'Número de Parámetros.(SE OBTIENE DE HOJA EXCEL). n>=1
Dim Lanzamientos As Long            'Número de veces que se lanza el Rosembrock
Dim paramFN() As Double
Dim ParamIniRosembrock() As Double
Dim LastOF As Double
Dim Iterations As Long

'Rosembrock
Dim h0() As Double                  'Incrementos, van variando en función si se mejora o empeora.
Dim Alpha As Double                 'Factor de expansión.(SE OBTIENE DE HOJA EXCEL). Alpha>1. Normalmente
es igual a 3
Dim Beta As Double                  'Factor de contracción.(SE OBTIENE DE HOJA EXCEL). -1<Beta<0.
Normalmente es igual a -0.5
Dim ErrorMin As Double              'Error minimo aceptable.(SE OBTIENE DE HOJA EXCEL). Depende de los
parametros y suele ser pequeño. Normalmente suele ser 0.001
Dim MaxItera As Long                'Número máximo de Iteraciones. (SE OBTIENE DE HOJA EXCEL).

Sub Driver_HCLR()
    Sheets("HCLR").Select()

    'comun
    n = Range("E10").value
    Lanzamientos = Range("E11").value

    LastOF = -10000
    Iterations = 0

    'HCL
    seed = Range("E3").value
    DimHCL = Range("E2").value

    ReDim ParametrosMin(n)
    ReDim ParametrosMax(n)
    Dim i As Long                    'Índice para bucles.
    For i = 1 To n
        ParametrosMin(i) = Cells(14, 3 + i).value
        ParametrosMax(i) = Cells(15, 3 + i).value
    Next i

    Call rninit(seed)

    'RB
    MaxItera = Range("E5").value
    Alpha = Range("E6").value
    Beta = Range("E7").value
    ErrorMin = Range("E8").value

    ReDim h0(n)
    For i = 1 To n
        h0(i) = Cells(17, 3 + i).value
    Next i

    Call HiperCuboLatino_Rosenbrock()

```



```
Sheets("HCLR").Select()
Range("D21").value = Iterations

For i = 1 To n
    Cells(19, 3 + i).value = paramFN(i)
Next i

End Sub

Sub HiperCuboLatino_Rosenbrock()

'=====
'===          ALGORITMO DE CALIBRACIÓN [HLR] HIPERCUBO LATINO Y ROSENBROCK          ===
'===
'===          Visual Basic para Aplicaciones          ===
'===
'===          Por Edgar Belda Ibáñez          Enero 2015          ===
'=====

'DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES

Dim i As Long          'Índice para bucles.
Dim p As Long          'Índice para bucles.
Dim k As Long          'Índice para bucles.
Dim j As Long          'Índice para bucles.
Dim q As Long          'Índice para bucles.

Dim Incrementos() As Double          'Incremento entre: el mejor conjunto de parametros, para un
determinado conjunto de ejes, y el mejor conjunto de parametros para el siguiente cambio de ejes. En el caso
especial del primer cambio de ejes Parametros0=X0
Dim MatrizRand() As Double
Dim MatrizParametros() As Double
Dim nMas1 As Long
Dim h2() As Double
Dim Parametros() As Double
Dim Fobj As Double

nMas1 = n + 1
Fobj = -10000

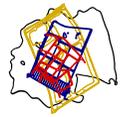
'REDIMENSIÓN DE VECTORES Y MATRICES

ReDim paramFN(n)
ReDim ParamIniRosembrock(n)
ReDim Parametros(n)
ReDim Incrementos(n)
ReDim MatrizRand(DimHCL, 2)
ReDim MatrizParametros(DimHCL, nMas1)
ReDim h(2)
ReDim h2(nMas1)

'LECTURA DE DATOS DE LA HOJA DE EXCEL
For i = 1 To n
    Incrementos(i) = (ParametrosMax(i) - ParametrosMin(i)) / (DimHCL - 1)
Next i

For k = 1 To n
    For i = 1 To DimHCL
        MatrizRand(i, 1) = urand()
        MatrizRand(i, 2) = i
    Next i

    For i = 1 To DimHCL - 1
        For j = 1 To (DimHCL - 1)
            If MatrizRand(j, 1) < MatrizRand(j + 1, 1) Then
                For q = 1 To 2
                    h(q) = MatrizRand(j, q)
                    MatrizRand(j, q) = MatrizRand(j + 1, q)
                    MatrizRand(j + 1, q) = h(q)
                Next q
            End If
        Next j
    Next i
End Sub
```



```

    For i = 1 To DimHCL
        MatrizParametros(i, k) = ParametrosMin(k) + Incrementos(k) * (MatrizRand(i, 2) - 1)
    Next i

Next k

'Evaluamos todas las soluciones del HCL
For k = 1 To DimHCL
    For i = 1 To n
        paramFN(i) = MatrizParametros(k, i)
    Next i
    MatrizParametros(k, nMas1) = FUNCTN()
Next k

'Ordenamos los resultados del HCL
For i = 1 To DimHCL - 1
    For j = 1 To (DimHCL - 1)
        If MatrizParametros(j, nMas1) < MatrizParametros(j + 1, nMas1) Then
            For q = 1 To nMas1
                h2(q) = MatrizParametros(j, q)
                MatrizParametros(j, q) = MatrizParametros(j + 1, q)
                MatrizParametros(j + 1, q) = h2(q)
            Next q
        End If
    Next j
Next i

For k = 1 To Lanzamientos
    For i = 1 To n
        ParamIniRosembrock(i) = MatrizParametros(k, i)
        paramFN(i) = MatrizParametros(k, i)
        'Cells(14, 3 + i).value = MatrizParametros(k, i)
    Next i
    LastOF = MatrizParametros(k, nMas1)
    'Application.Calculate

    Call RosenBrock()

    If k = 1 Then
        Fobj = LastOF
        For i = 1 To n
            Parametros(i) = paramFN(i)
        Next i
    End If

    If LastOF > Fobj Then
        Fobj = LastOF
        For i = 1 To n
            Parametros(i) = paramFN(i)
        Next i
    End If
Next k

'Final
For i = 1 To n
    paramFN(i) = Parametros(i)
Next i
Dim auxFN As Double
auxFN = FUNCTN()

End Sub

Sub RosenBrock()

'=====
'===      OPTIMIZACION DE UNA FUNCION NO LINEAL MEDIANTE EL METODO DE ROSENBROCK      ===
'===
'===      Algoritmo de Rosenbrock para Maximizar una función no lineal, unimodal y      ===
'===      dependiente de múltiples variables no restringidas. Visual Basic para Aplicaciones  ===
'===
'===                               Por Edgar Belda Ibáñez                               Enero 2015                               ===
'=====

'DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES

```



```
Dim i As Long 'Índice para bucles.
Dim p As Long 'Índice para bucles.
Dim k As Long 'Índice para bucles.
Dim j As Long 'Índice para bucles.
Dim q As Long 'Índice para bucles.

Dim Fobj0 As Double 'Mejor Valor de la función objetivo.
Dim Fobj1 As Double 'Valor de la función objetivo que se analiza en determinada
iteración.
Dim ErrorRB As Double 'Error de la iteración actual.
Dim Empeora() As Long 'Vector que almacena un 1 en cada una de sus componentes si se ha
producido un fallo en el eje correspondiente. Si no se ha producido fallo el valor de la componente es 0
Dim AcumEmpeora As Double 'Variable para sumar todos los fallos del vector Empeora()

Dim Parametros() As Double 'Mejor conjunto de parámetros que maximizan la función objetivo.
Dim Parametros0() As Double 'Mejor conjunto de parámetros antes de realizar un cambio de ejes.
Dim h() As Double 'Incrementos, van variando en función si se mejora o empeora.
Dim Mejora As Boolean 'Variable encargada de controlar si con una determinada dirección de
ejes se produce una mejora.
Dim e() As Double 'Matriz de tamaño nxn con la dirección de los ejes.
Dim he() As Double 'Incremento en función del eje correspondiente. Que se calcula como
h(k)*e(k,i)
Dim x() As Double 'Vector de parámetros que se está analizando.
Dim IncrementoX() As Double 'Incremento entre: el mejor conjunto de parámetros, para un
determinado conjunto de ejes, y el mejor conjunto de parámetros para el siguiente cambio de ejes. En el caso
especial del primer cambio de ejes Parametros0=X0
Dim Continua As Boolean 'Variable encargada de controlar si Error > ErrorMin. Mientras sea
True el Bucle continua.
Dim r() As Double 'Direcciones cambiadas pero Ortonormales.
Dim Mr1 As Double 'Modulo del primer vector de la matriz r(n, n)
Dim a() As Double 'Componentes para la ortogonalización de Gram-Schmidt
Dim v() As Double 'Componentes para la ortogonalización de Gram-Schmidt
Dim Itera As Long

'REDIMENSIÓN DE VECTORES Y MATRICES

ReDim Empeora(n)
ReDim Parametros(n)
ReDim Parametros0(n)
ReDim h(n)
ReDim x(n)
ReDim he(n)
ReDim IncrementoX(n)
ReDim e(n, n)
ReDim Mr1 As Double
ReDim r(n, n)
ReDim v(n, n)
ReDim a(n, n)

'LECTURA DE DATOS DE LA HOJA DE EXCEL
For i = 1 To n
    'Se copian los parámetros iniciales en las celdas de parametros de X0 -> X
    Parametros(i) = ParamIniRosembrock(i)
    Parametros0(i) = Parametros(i) 'Inicialmente "Parametros" es igual a "Parametros0"
Next i

'Application.Calculate 'Se recalcula la hoja
Fobj0 = LastOF 'Se almacena en la variable Fobj0 el valor de la Función Objetivo con los valores de X0

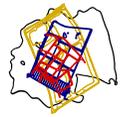
For i = 1 To n
    h(i) = h0(i) 'Inicialmente "h" (incrementos de parámetros) es igual a "h0"
Next i

'INICIACIÓN DE VARIABLES

Itera = 0 'Se inicializa el contador de iteraciones.

For i = 1 To n
    e(i, i) = 1 'Se crea los ejes principales (Matriz Identidad).
Next i

Mejora = False
ErrorRB = ErrorMin + 1 'A la variable Error se le asigna un valor más grande que ErrorMin para que
inicialmente entre en el Bucle Principal.
Continua = True 'Variable encargada de controlar si Error > ErrorMin. Mientras sea True el
Bucle continua.
AcumEmpeora = 0 'Suma de fallos para cada uno de los ejes. Cuando valga "n" se habrán
producido fallos en todas las direcciones.
k = 1 'Índice del eje analizado. Se establece en 1 que corresponde con el primer
"e1". Posteriormente irá variando desde 1 a n.
```



```

'BUCLE PRINCIPAL (INICIO)
Do While Itera < MaxItera And Continua 'El bucle continua mientras el numero de
iteraciones sea más bajo que el máximo establecido, y también mientras Error > ErrorMin.

    For p = 1 To n
        he(p) = e(k, p) * h(k) 'Vector "he" es el incremento en función del eje
correspondiente.
        x(p) = Parametros(p) + he(p) 'Vector "x" es la suma del mejor conjunto de
parametros y el incremento.
        paramFN(p) = x(p) 'Se escribe el vector "x" en la hoja de excel para ser
evaluado.
    Next p
    Fobj1 = FUNCTN() 'Se almacena el valor de la función objetivo en la variable Fobj1

    'COMPROBAR SI MEJORA O NO
    If Fobj1 > Fobj0 Then 'Se comprueba si el conjunto de parametros del
vector "x" mejora la Fobj0 (que es la mejora por ahora).
        'MEJORA 'En este caso MEJORA

        h(k) = Alpha * h(k) 'Al mejorar el incremento correspondiente se
multiplica por alpha
        Fobj0 = Fobj1 'El valor de la función objetivo pasa a la
variable Fobj0, ya que es el mejor hasta la fecha.
        Parametros = x 'El conjunto de valores de "x" se almacena en
Parametros ya que son los que mejor resultado se ha obtenido.
        Mejora = True 'La variable "Mejora" cambia a True, ya que se ha
producido una mejora.
    Else 'El valor de Fobj1<=Fobj0 por tanto:
        'NO MEJORA 'En este caso NO MEJORA

        h(k) = Beta * h(k) 'Al no mejorar se multiplica el incremento por
beta (este es negativo y cambia el sentido del incremento).
        Empeora(k) = 1 'Se asigna un 1 en la posición correspondiente al
eje que empeora.
        AcumEmpeora = 0 'Si vacia la variable AcumEmpeora

        For p = 1 To n
            AcumEmpeora = AcumEmpeora + Empeora(p) 'Se comprueba si ha empeorado en todas las
direcciones
        Next p
    End If

    If Abs(AcumEmpeora) = n And Mejora Then 'Se comprueba si se ha producido alguna mejora, y
además fracaso en todas las direcciones.
        'CAMBIO DE EJES (INICIO)

        'CÁLCULO DE LOS INCREMENTOS DE X Y DEL ERROR
        ErrorRB = 0 'Se vacia la variable Error.
        For i = 1 To n
            IncrementoX(i) = Parametros(i) - Parametros0(i) 'Cálculo de los incrementos de X.
            Parametros0(i) = Parametros(i) 'Los nuevos parametros pasan a ser los
de los ejes anteriores.
            ErrorRB = ErrorRB + Abs(IncrementoX(i)) 'Suma en valor absoluto del vector
incrementos de X.
        Next i

        If ErrorRB < ErrorMin Then 'Error más pequeño que el valor mínimo. Se acaba el
proceso de optimización.
            Continua = False
        Else

            'CÁLCULO DE LOS r(i)

            For i = 1 To n
                For j = 1 To n
                    If j + i > n + 1 Then
                        r(i, j) = 0
                    Else
                        r(i, j) = IncrementoX(j)
                    End If
                Next j
            Next i

            'ORTOGONALIZACIÓN DE GRAM SCHMIDT

            'MÓDULO DE r1

```



```
Mr1 = 0

For j = 1 To n
    Mr1 = Mr1 + r(1, j) * r(1, j)
Next j

Mr1 = Sqr(Mr1)

'NUEVO EJE e1
For i = 1 To n
    e(1, i) = r(1, i) / Mr1
Next i

'CÁLCULO DEL RESTO DE EJES
For i = 2 To n
    For j = 1 To i
        If i = j Then

            a(i, j) = 0
            For p = 1 To n
                a(i, j) = a(i, j) + v(i, p) * v(i, p)
            Next p
            a(i, j) = Sqr(a(i, j))

        Else
            a(i, j) = 0
            For p = 1 To n
                a(i, j) = a(i, j) + r(i, p) * e(j, p)
            Next p
        End If

        For p = 1 To n
            v(i, p) = r(i, p)
            For q = 1 To i - 1
                v(i, p) = v(i, p) - a(i, q) * e(q, p)
            Next q
        Next p
    Next j

    For p = 1 To n
        If a(i, i) = 0 Then
            e(i, p) = 0
        Else
            e(i, p) = v(i, p) / a(i, i)
        End If
    Next p
Next i

AcumEmpeora = 0                                     'Se vuelve a inicializar la variable
AcumEmpeora y el vector Empeora().
For p = 1 To n
    Empeora(p) = 0
Next p

h = h0                                               'Los incrementos vuelven a ser los iniciales.
Mejora = False                                       'Se restablece la variable Mejora.

End If
End If
'CAMBIO DE EJES (FIN)

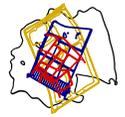
If k < n Then                                       'Si k es menor que n se aumenta en 1 y por tanto se analizará el
siguiente eje.
    k = k + 1
Else
    k = 1                                           'Si k es igual que n se reinicializa al valor 1 y por tanto se
analizará el primer eje.
End If
Itera = Itera + 1                                   'Se lleva la cuenta de las iteraciones.

Loop

End Sub

Function FUNCNT()
    Dim value As Double
    Dim x1, x2, u1, u2, u3, u4, u5, u6 As Double

    x1 = paramFN(1)
```

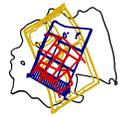


```
x2 = paramFN(2)

u1 = (x1 + x2 + 1.0#) ^ 2
u2 = 19.0# - 14.0# * x1 + 3.0# * x1 ^ 2 - 14.0# * x2 + 6.0# * x1 * x2 + 3.0# * x2 ^ 2
u3 = (2.0# * x1 - 3.0# * x2) ^ 2
u4 = 18.0# - 32.0# * x1 + 12.0# * x1 ^ 2 + 48.0# * x2 - 36.0# * x1 * x2 + 27.0# * x2 ^ 2
u5 = u1 * u2
u6 = u3 * u4
value = (1.0# + u5) * (30.0# + u6)

Iterations = Iterations + 1
LastOF = -value
FUNCTN = -value
Sheets("HCLR").Range("D20").value = -value

End Function
```



D. Código RNA

{ANEJO D}

En este anejo se adjunta el código para VBA necesario para el cálculo de una RNA con una determinada topología. Permite crear RNA con una sola capa interna, pero con un número indeterminado de nodos. También se permite incorporar varios inputs, aunque el resultado de la red es un solo *output*. En el caso del cálculo del pH se puede ver de forma gráfica en la Ilustración 4-6.

```

'=====
'====          FUNCIÓN PARA EL CÁLCULO DE REDES NEURONALES ATIFICIALES EN EXCEL          =====
'====
'====
'====          Por Edgar Belda Ibáñez          Febrero 2015          =====
'=====

Function RNA(Inputs As Range, Pesos1 As Range, Pesos2 As Range)

    Dim aux As Double
    Dim NumInputs As Long, NumNodos As Long
    Dim i As Long, j As Long

    NumInputs = Inputs.Count
    NumNodos = Pesos2.Count - 1

    Dim aux2() As Double
    ReDim aux2(1 To NumNodos)

    For i = 1 To NumNodos
        For j = 1 To NumInputs
            aux2(i) = aux2(i) + Inputs(j) * Pesos1(j, i)

        Next j
        aux2(i) = aux2(i) + Pesos1(j, i)
        aux2(i) = WorksheetFunction.Tanh(aux2(i))
    Next i

    For i = 1 To NumNodos
        aux = aux + aux2(i) * Pesos2(i)
    Next i
    aux = aux + Pesos2(i)

    aux = WorksheetFunction.Tanh(aux)

    RNA = aux

End Function

```

La estructura de la función en Excel es la siguiente:



$$Output = RNA(Inputs(n) ; Pesos(n + 1; m) ; PesosOutput(m + 1))$$

Siendo:

- n= número de inputs
- m=número de nodos ocultos

Ejemplo de Red Neuronal Artificial con 3 inputs y 2 nodos ocultos:

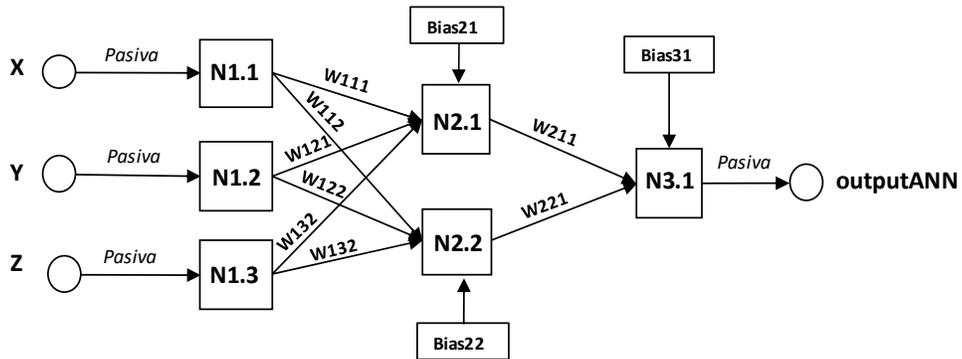


Ilustración (Anejos) 2. Diagrama de cálculo de la RNA.

Y la estructura de cálculo en la hoja de Excel es:

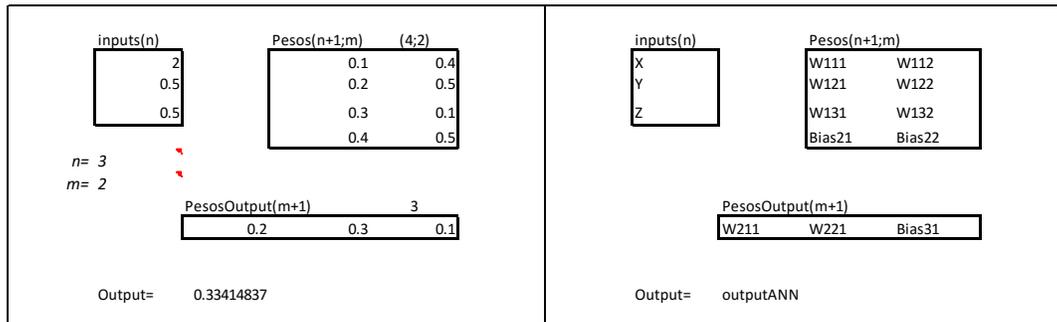


Ilustración (Anejos) 3. Estructura de cálculo en la hoja de Excel.



E. Datos

{ANEJO E}

En este anejo se muestran los datos del modelo para el tancat de Milia.

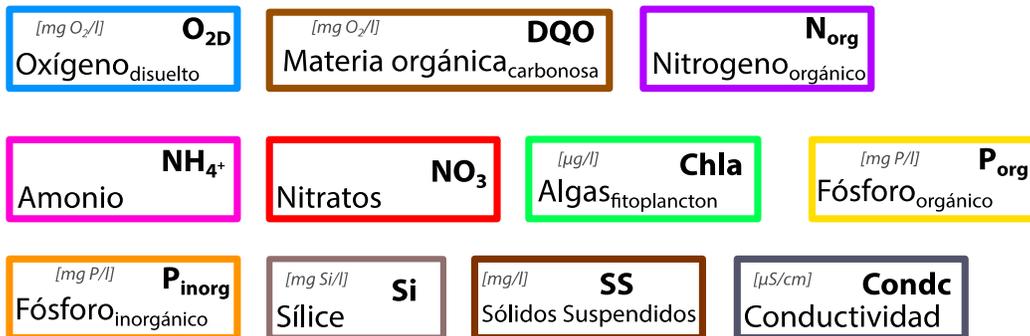
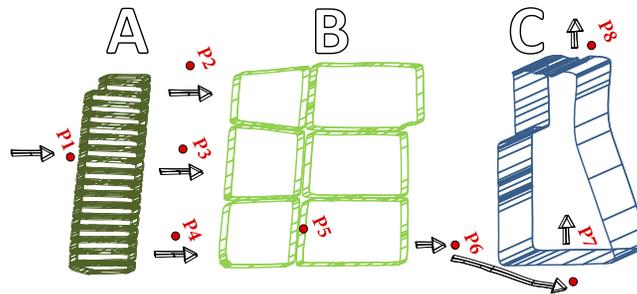
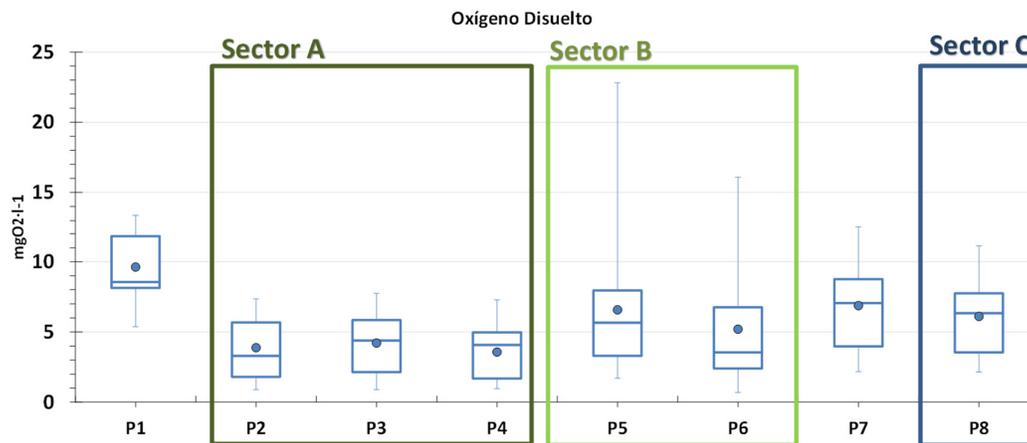


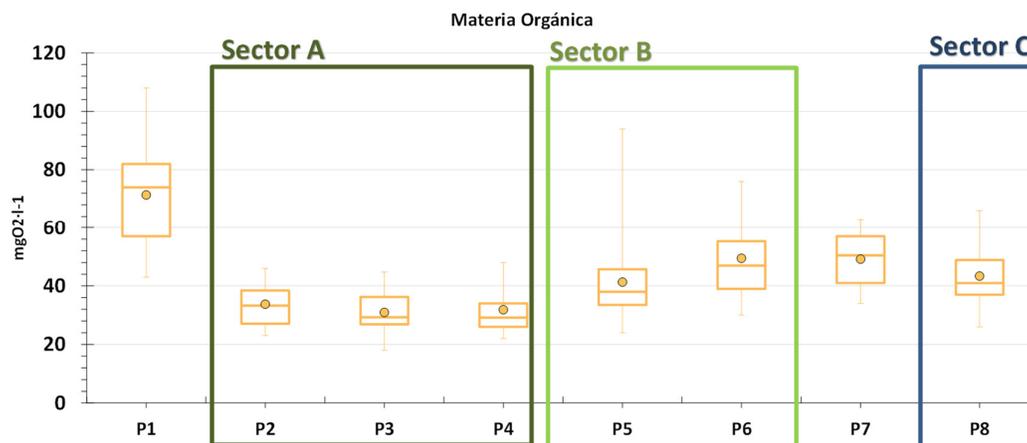
Ilustración (Anejos) 4. Constituyentes modelados con HUMEDAL.

(a) Perfiles de contaminantes tancat Milia

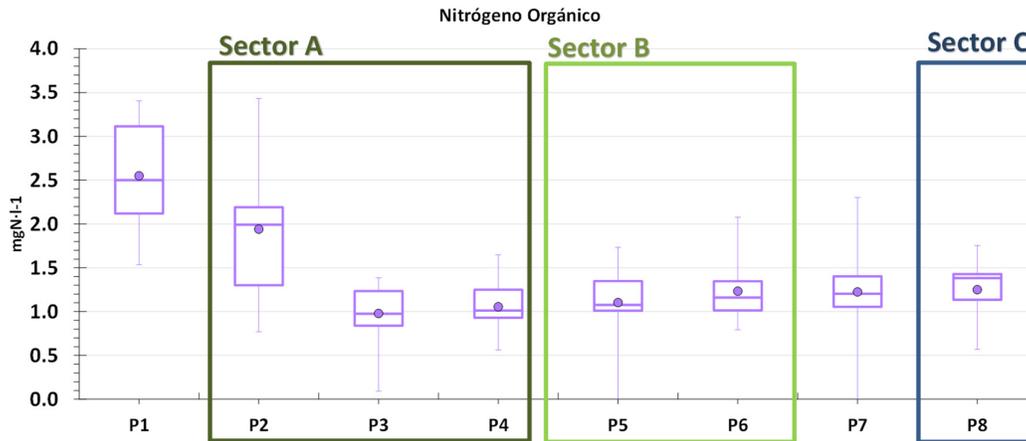
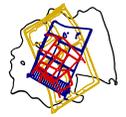




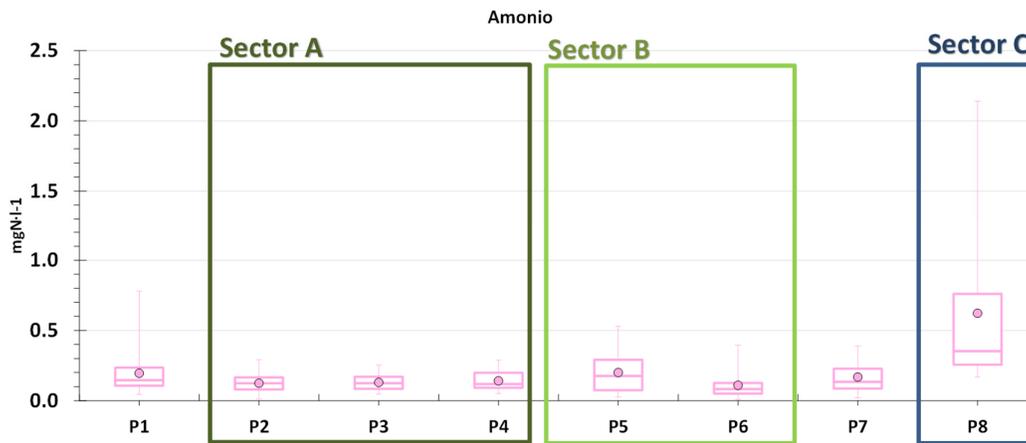
Gráfica (Anejos) 1. Perfil de concentraciones de Oxígeno Disuelto en el tancat de Milia.



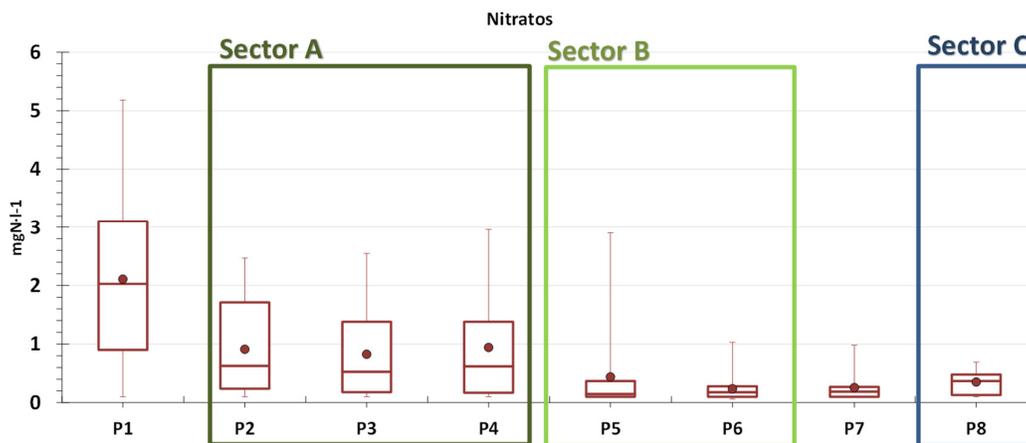
Gráfica (Anejos) 2. Perfil de concentraciones de Materia Orgánica en el tancat de Milia.



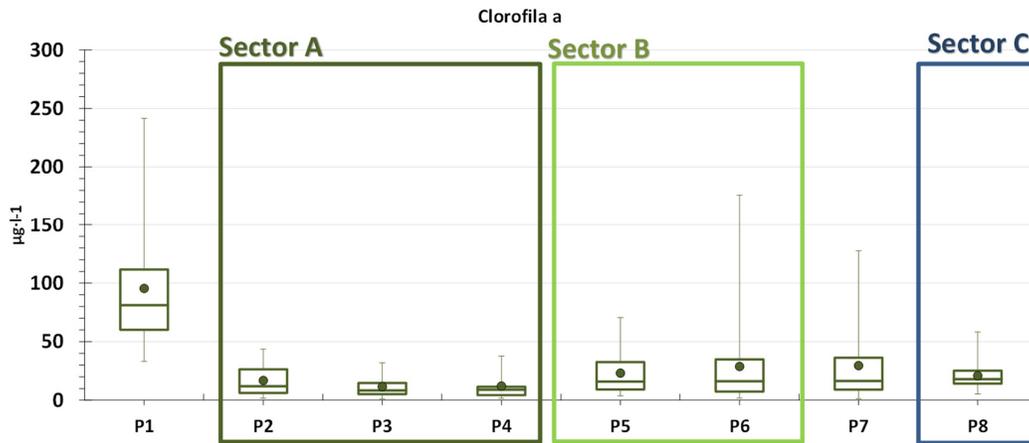
Gráfica (Anejos) 3. Perfil de concentraciones de Nitrógeno Orgánico en el tancat de Milia.



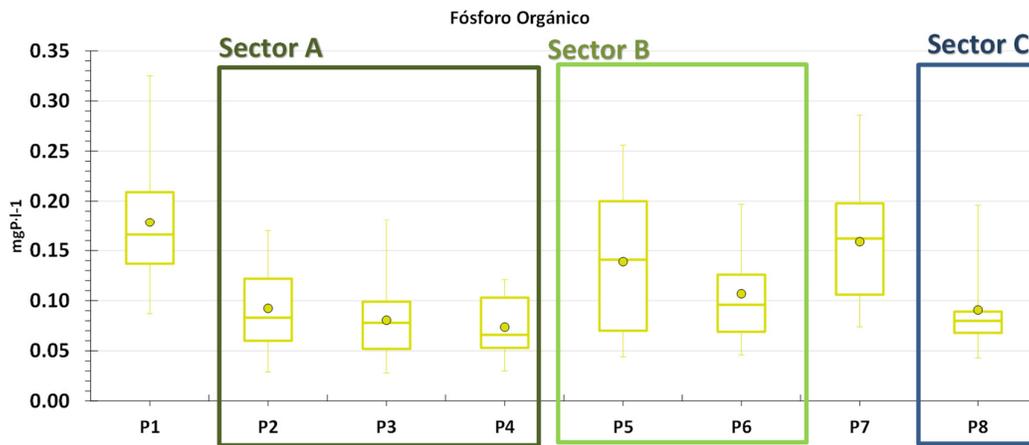
Gráfica (Anejos) 4. Perfil de concentraciones de Amonio en el tancat de Milia.



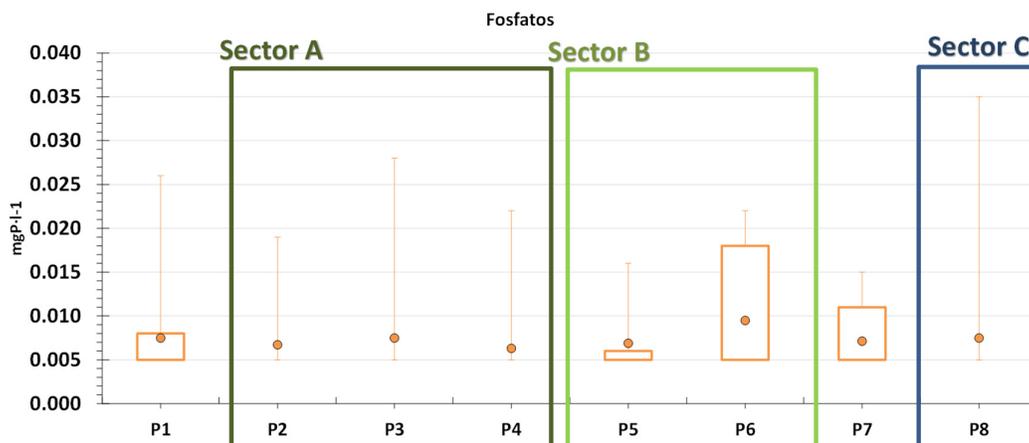
Gráfica (Anejos) 5. Perfil de concentraciones de Nitratos en el tancat de Milia.



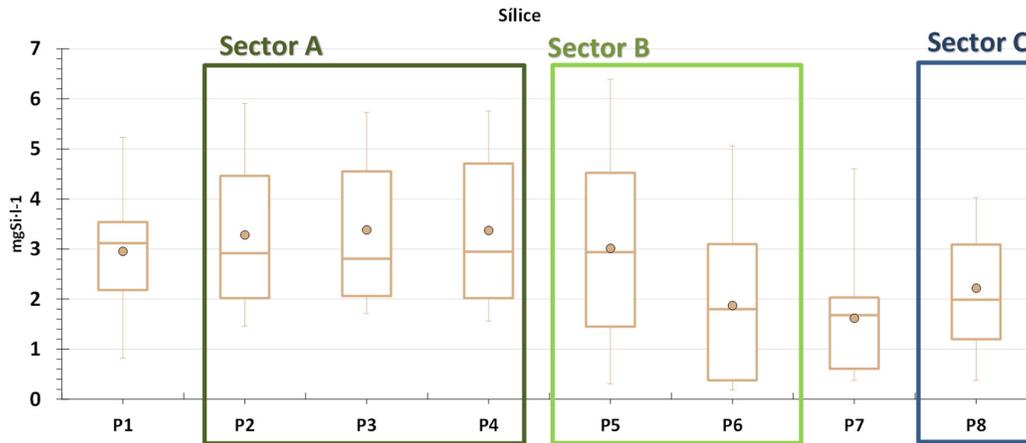
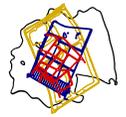
Gráfica (Anejos) 6. Perfil de concentraciones de Clorofila a en el tancat de Milia.



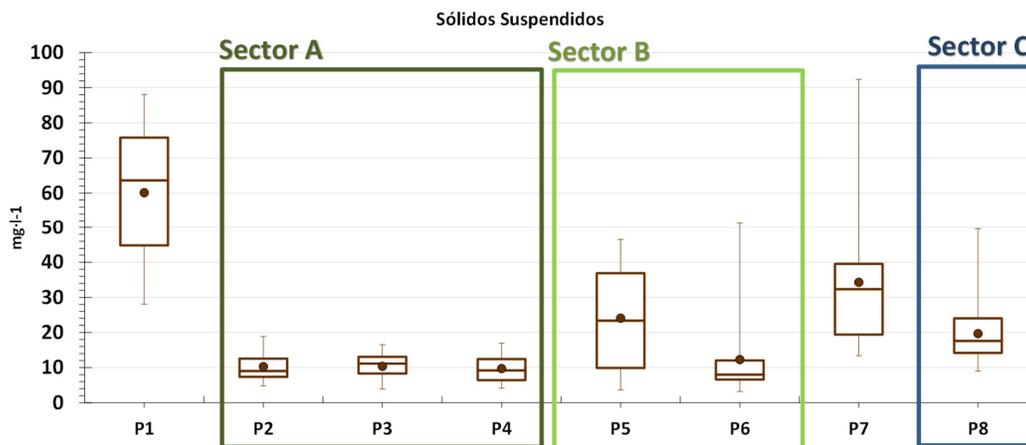
Gráfica (Anejos) 7. Perfil de concentraciones de Fósforo Orgánico en el tancat de Milia.



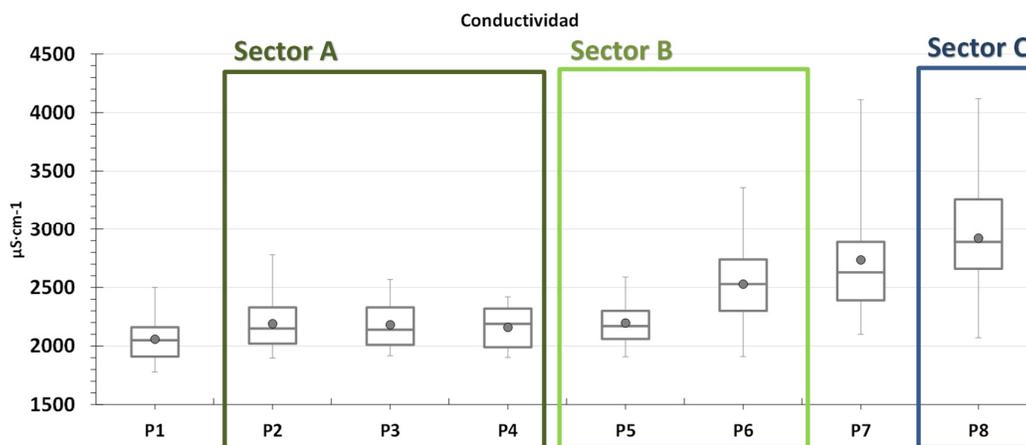
Gráfica (Anejos) 8. Perfil de concentraciones de Fosfatos en el tancat de Milia.



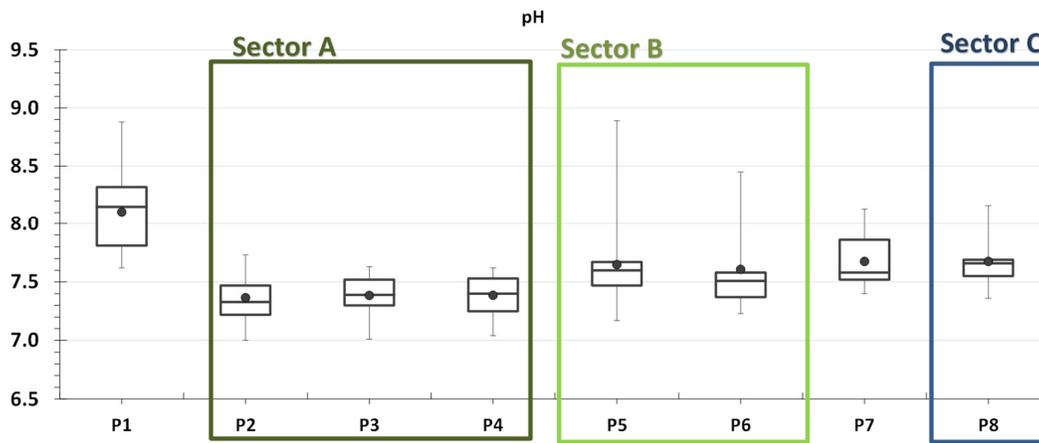
Gráfica (Anejos) 9. Perfil de concentraciones de Sílice en el tancat de Milia.



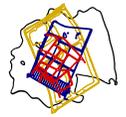
Gráfica (Anejos) 10. Perfil de concentraciones de Sólidos Suspensos en el tancat de Milia.



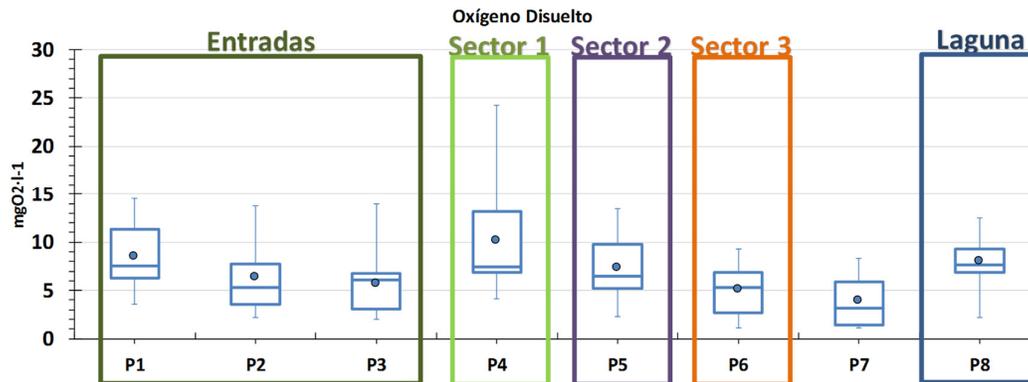
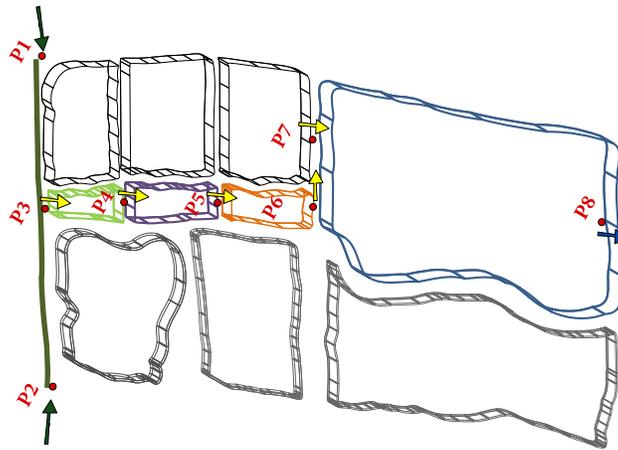
Gráfica (Anejos) 11. Perfil de concentraciones de Conductividad en el tancat de Milia.



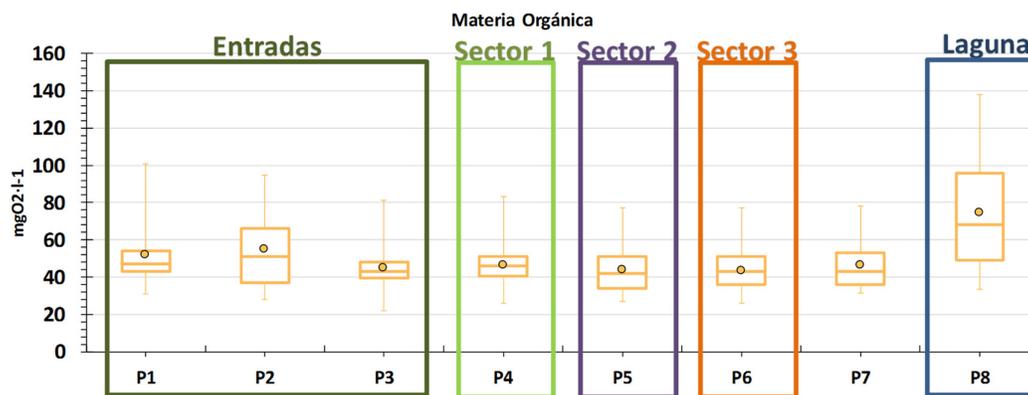
Gráfica (Anejos) 12. Perfil de pH en el tancat de Milia.



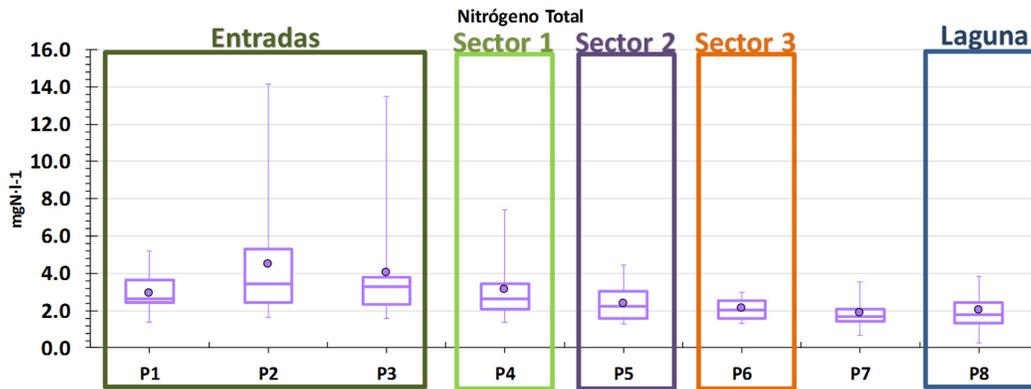
(b) Perfiles de contaminantes tancat de la Pipa



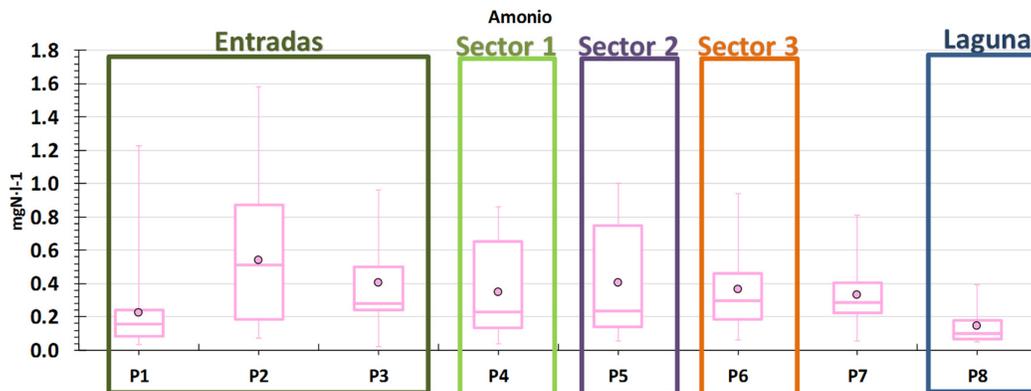
Gráfica (Anejos) 13. Perfil de concentraciones de Oxígeno Disuelto en el tancat de Pipa.



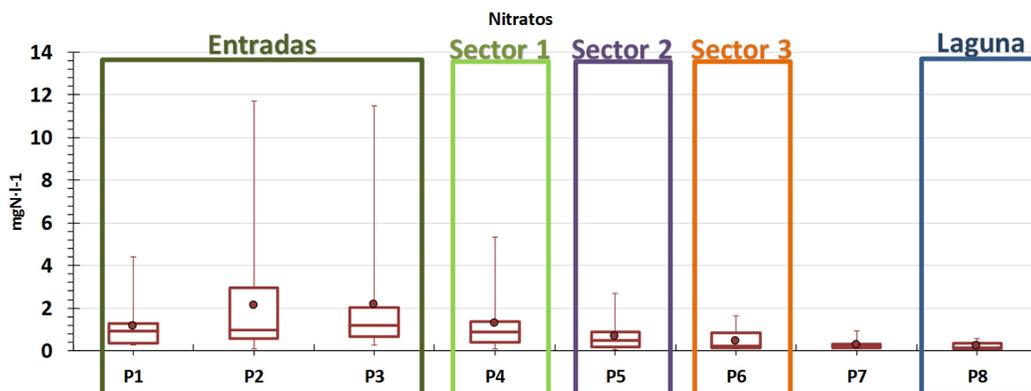
Gráfica (Anejos) 14. Perfil de concentraciones de Materia Orgánica en el tancat de Pipa.



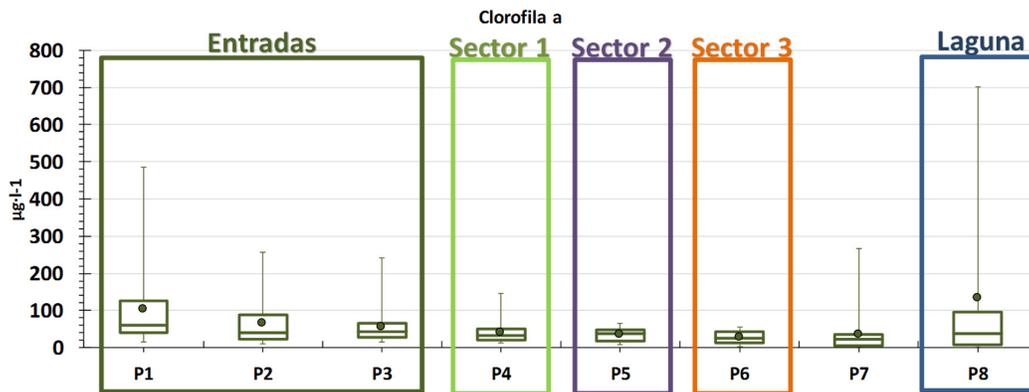
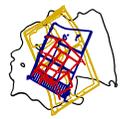
Gráfica (Anejos) 15. Perfil de concentraciones de Nitrógeno Orgánico en el tancat de Pipa.



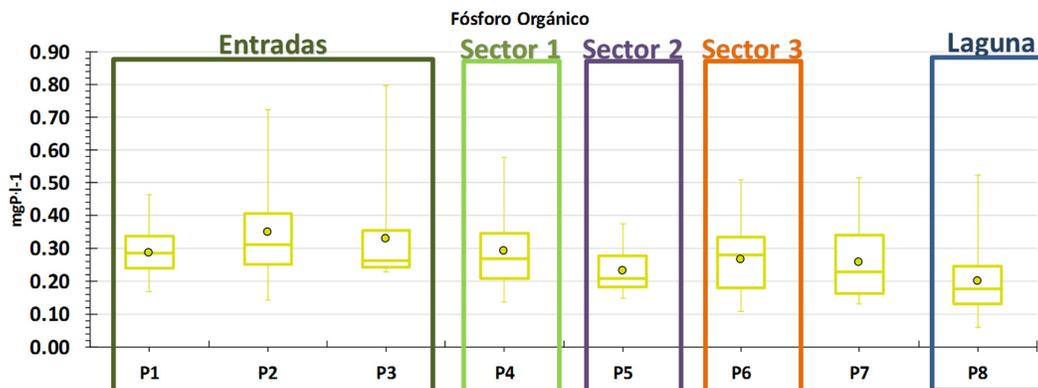
Gráfica (Anejos) 16. Perfil de concentraciones de Amonio en el tancat de Pipa.



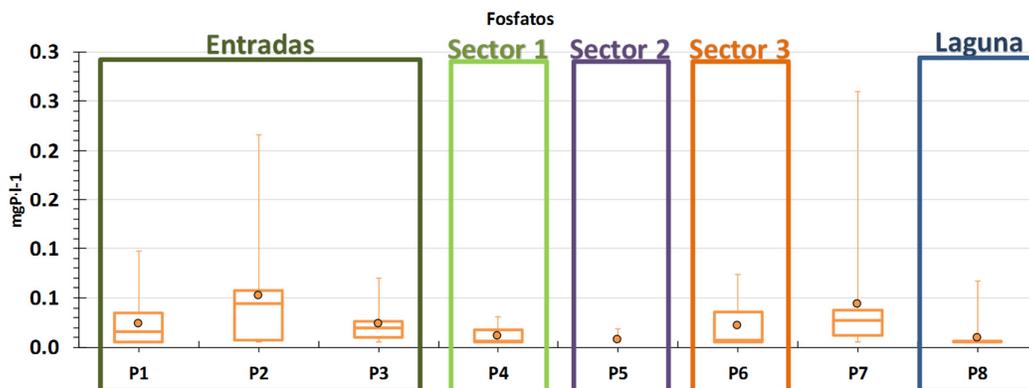
Gráfica (Anejos) 17. Perfil de concentraciones de Nitratos en el tancat de Pipa.



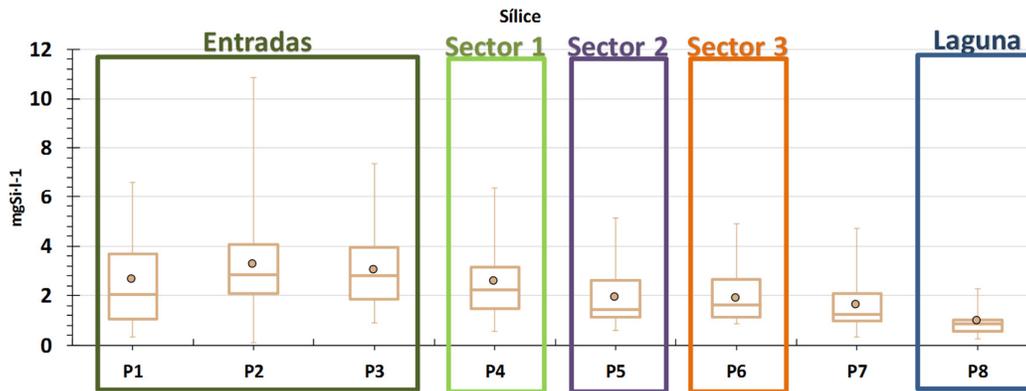
Gráfica (Anejos) 18. Perfil de concentraciones de Clorofila a en el tancat de Pipa.



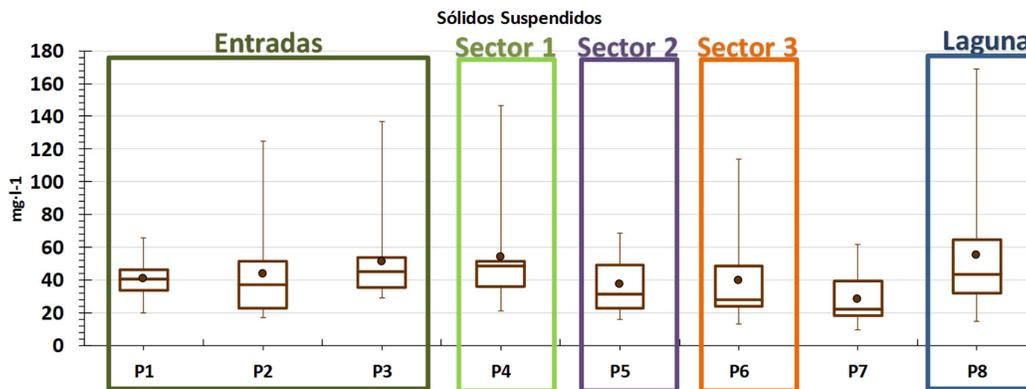
Gráfica (Anejos) 19. Perfil de concentraciones de Fósforo Orgánico en el tancat de Pipa.



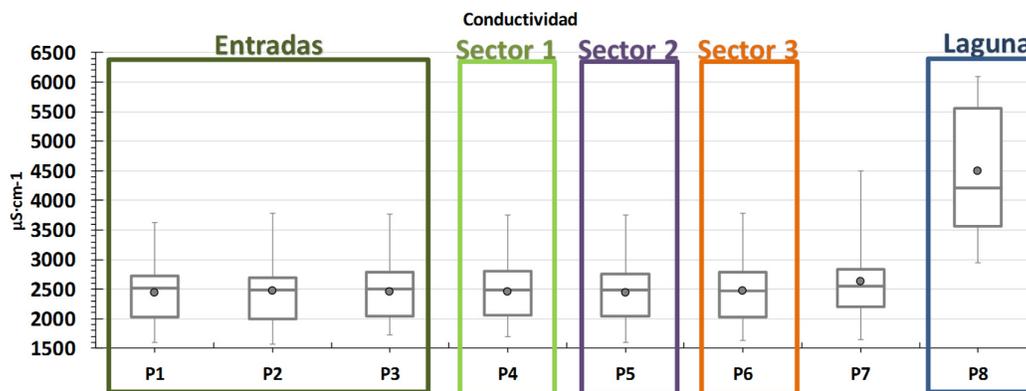
Gráfica (Anejos) 20. Perfil de concentraciones de Fosfatos en el tancat de Pipa.



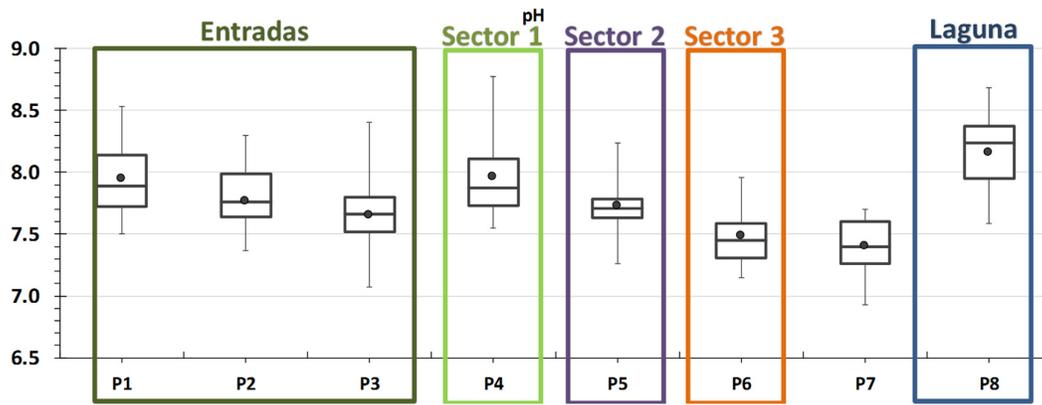
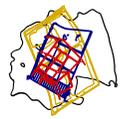
Gráfica (Anejos) 21. Perfil de concentraciones de Silice en el tancat de Pipa.



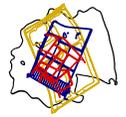
Gráfica (Anejos) 22. Perfil de concentraciones de Sólidos Suspendedos en el tancat de Pipa.



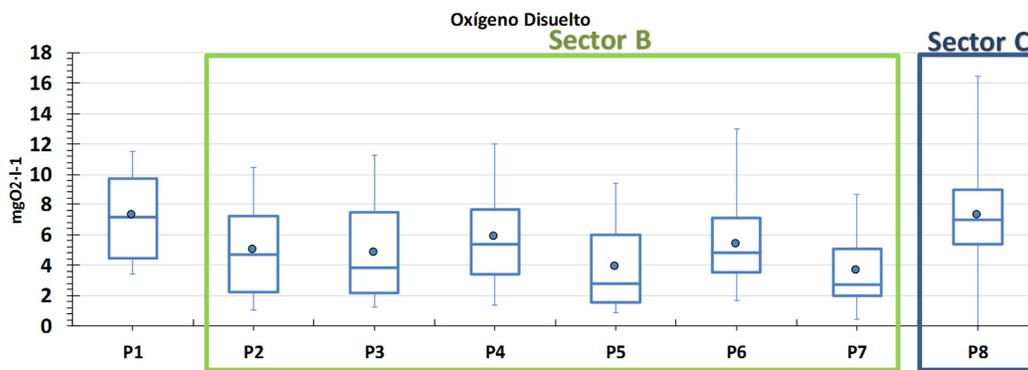
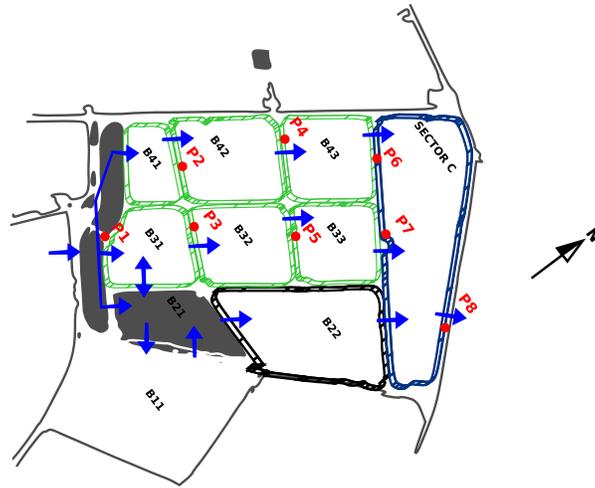
Gráfica (Anejos) 23. Perfil de concentraciones de Conductividad en el tancat de Pipa.



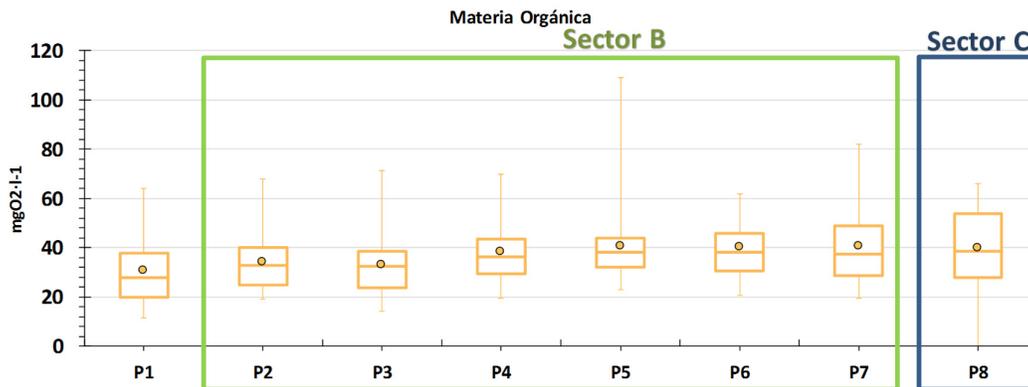
Gráfica (Anejos) 24. Perfil de pH en el tancat de Pipa.



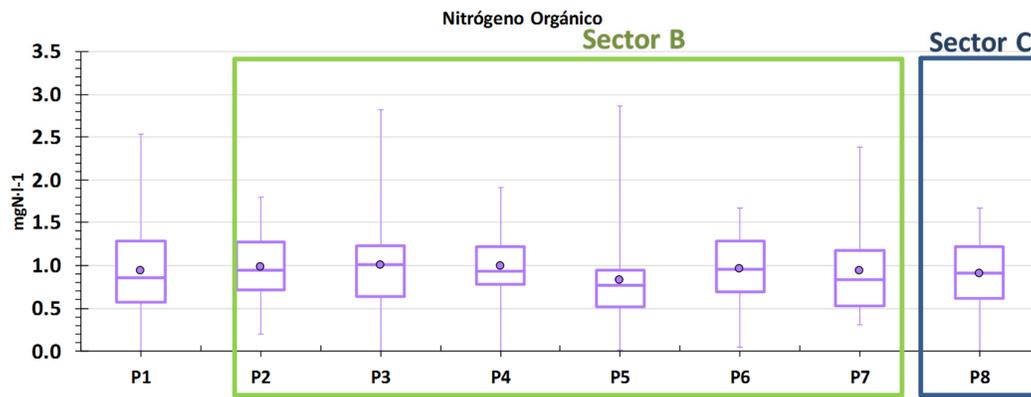
(c) Perfiles de contaminantes tancat L'Illa



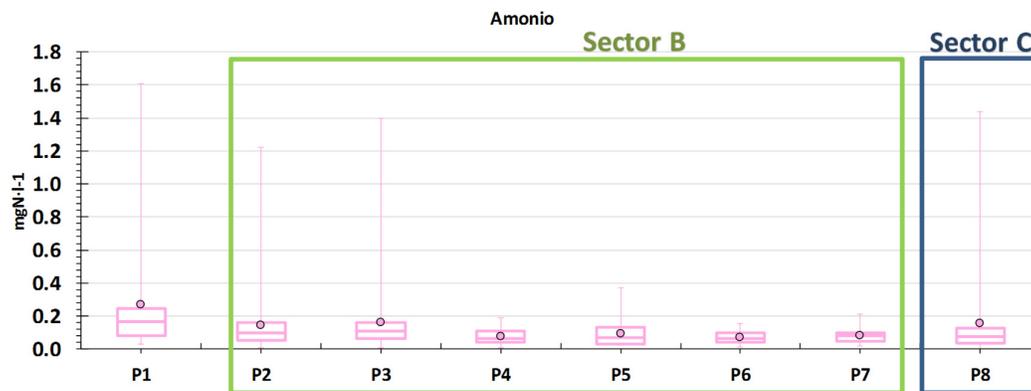
Gráfica (Anejos) 25. Perfil de concentraciones de Oxígeno Disuelto en el tancat de L'Illa.



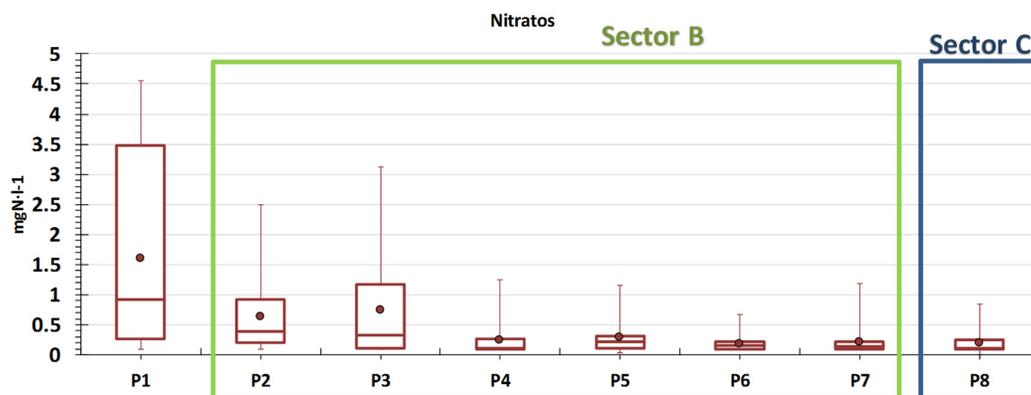
Gráfica (Anejos) 26. Perfil de concentraciones de Materia Orgánica en el tancat de L'Illa.



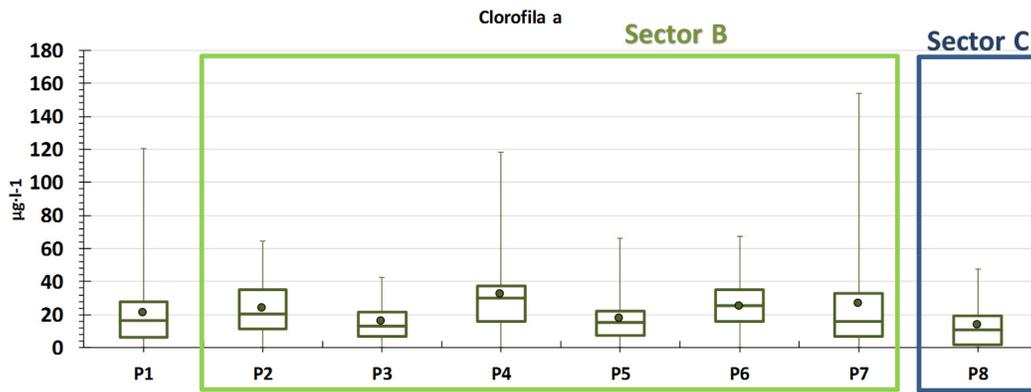
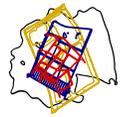
Gráfica (Anejos) 27. Perfil de concentraciones de Nitrógeno Orgánico en el tancat de L'Illa.



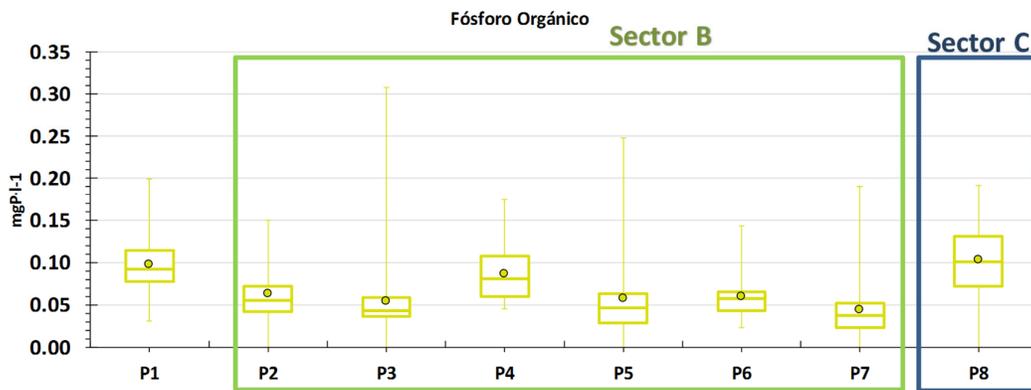
Gráfica (Anejos) 28. Perfil de concentraciones de Amonio en el tancat de L'Illa.



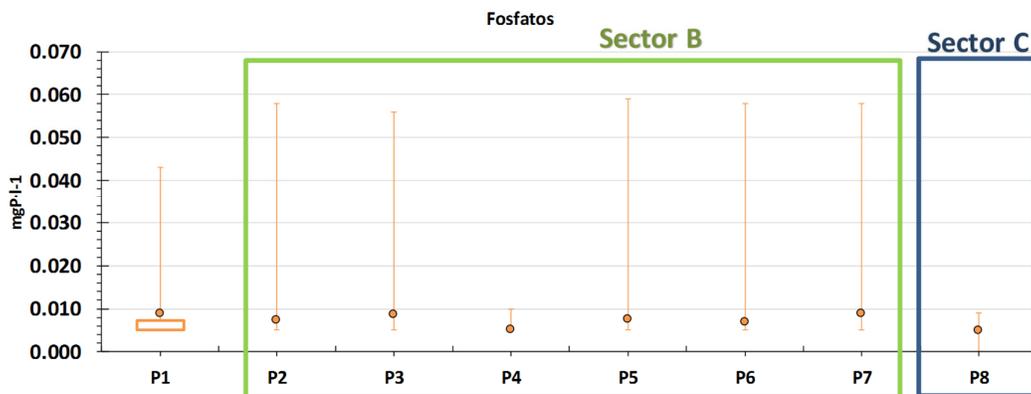
Gráfica (Anejos) 29. Perfil de concentraciones de Nitratos en el tancat de L'Illa.



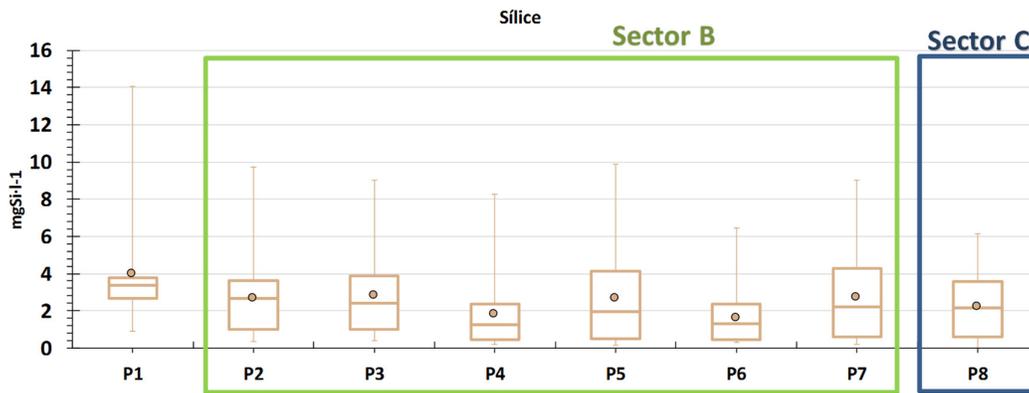
Gráfica (Anejos) 30. Perfil de concentraciones de Clorofila a en el tancat de L'Illa.



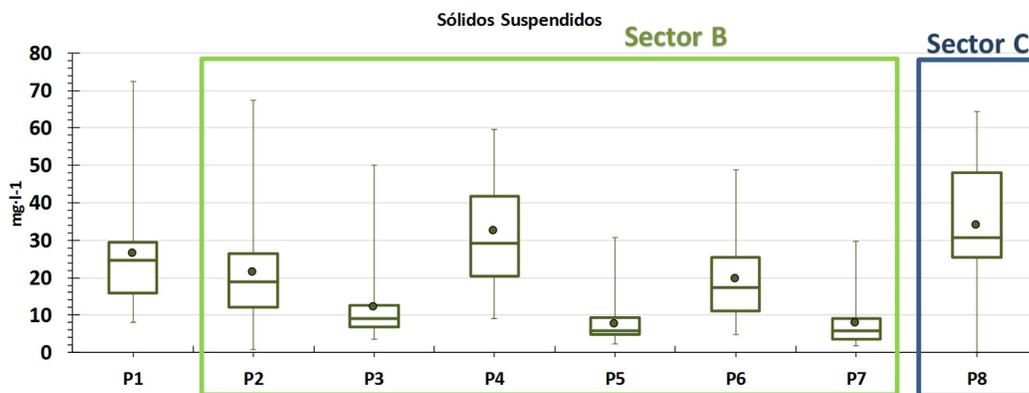
Gráfica (Anejos) 31. Perfil de concentraciones de Fósforo Orgánico en el tancat de L'Illa.



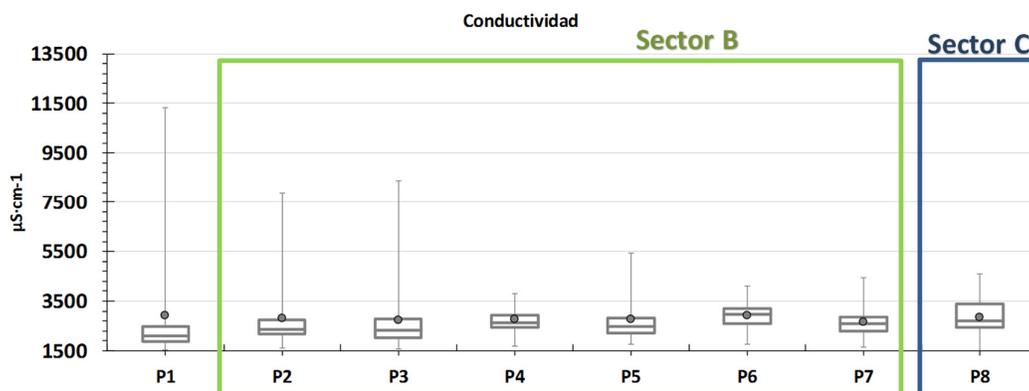
Gráfica (Anejos) 32. Perfil de concentraciones de Fosfatos en el tancat de L'Illa.



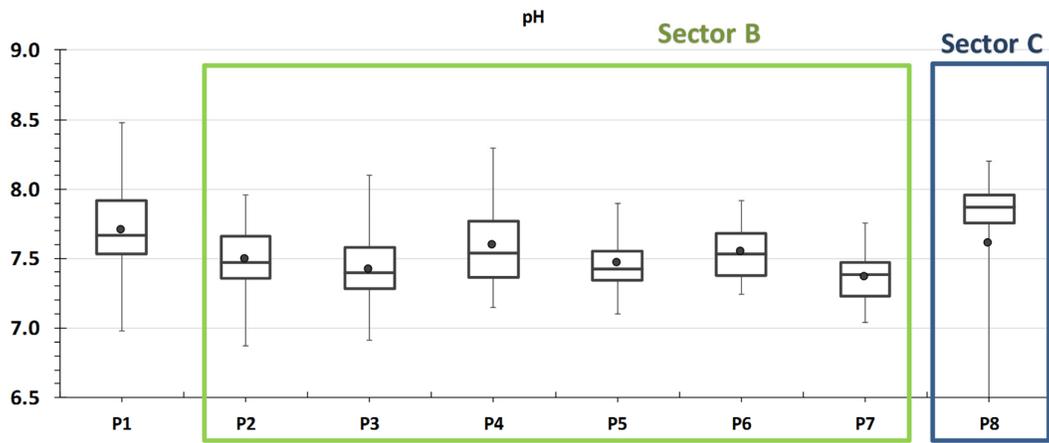
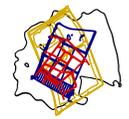
Gráfica (Anejos) 33. Perfil de concentraciones de Sílice en el tancat de L'Illa.



Gráfica (Anejos) 34. Perfil de concentraciones de Sólidos Suspensos en el tancat de L'Illa.



Gráfica (Anejos) 35. Perfil de concentraciones de Conductividad en el tancat de L'Illa.



Gráfica (Anejos) 36. Perfil de pH en el tancat de L'Illa.

