Disertación de **Agustín Pedro Monteoliva Herreras**
para optar al grado de Doctor

Tesis dirigida por el Prof. Dr.
Juan Carlos Canteras Jordana

Aproximación basada en Ciberinfraestructuras Remotas y Modelado para Mejorar la Gestión de la Eutrofización en Lagos y Embalses

UC
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Contenidos de la exposición

- Presentación
  - Introducción al problema ambiental
  - Presentación del proyecto
- Desarrollo
  - Métodos
  - Resultados
  - Discusión
- Conclusión

Presentación

- Problema ambiental: Eutrofización y cianobacterias
- Caso de estudio: Embalse de La Cuerda del Pozo (Soria)
- Proyecto
  - Carencias y retos
  - Principales objetivos y enfoque

Problema ambiental tratado

- Cuando los crecimientos son de cianobacterias, nos referiremos a ellos como cHAB, siglas en inglés para proliferaciones masivas de algas nocivas causadas por cianobacterias.
- En un cHAB, se añade a los efectos anteriores el potencial tóxico de algunas especies de este grupo, con consecuencias sanitarias que pueden ser de leves a muy graves: Irritaciones piel y ojos, fallo hepático, enfermedad neurológica irreversible, cáncer, …).
- Vías de exposición principales *(WHO, 2003)*: Baño, abastecimiento de agua potable, inhalación de espray en actividades recreativas acuáticas.

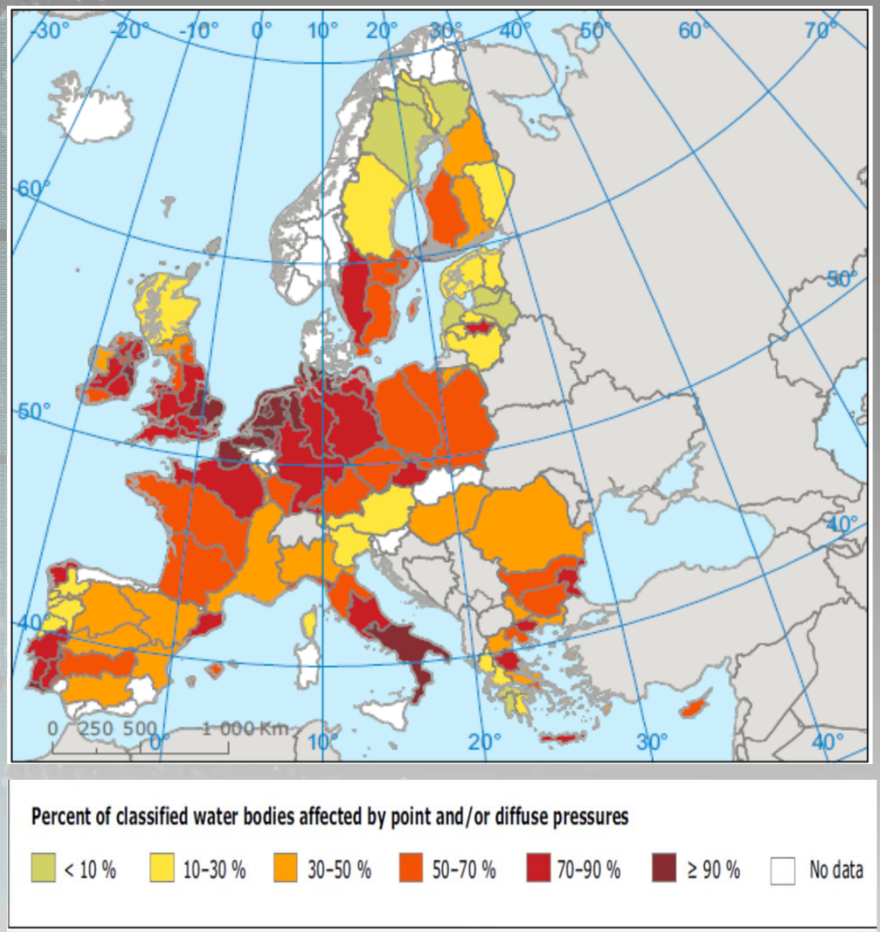
Carácter global

Cianobacterias amenazan salud de grandes masas de agua continentales del mundo (lago Zurich, Victoria, Erie, Taihu, Kokotel).

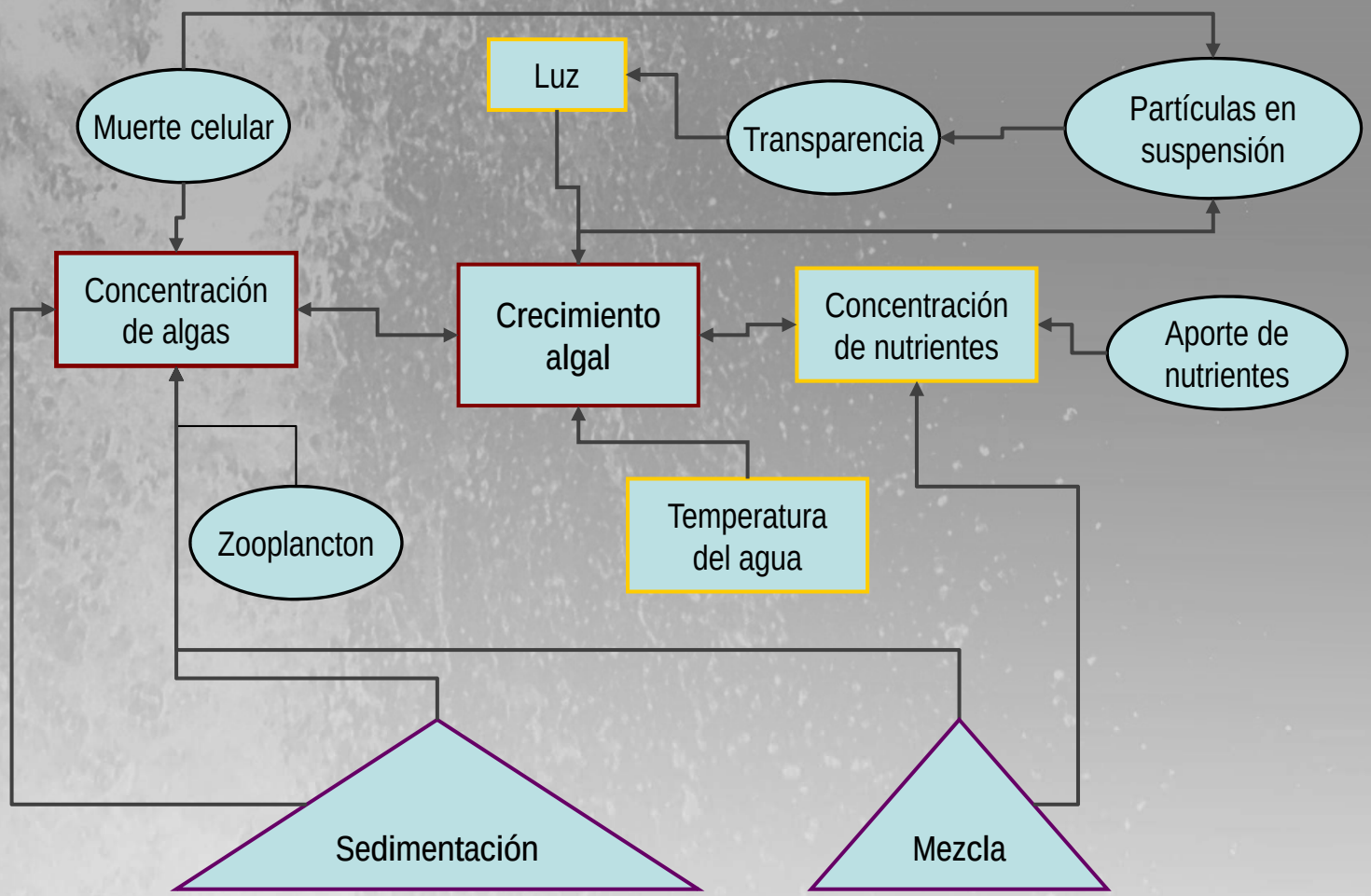
En Europa en riesgo eutrofización >50% de los principales lagos y embalses de 2.227 en base de datos "WISE" (EEA, 2012).

Casi el 40% de los 359 embalses españoles en WISE presentan dominancias de cianobacterias (CEDEX, 2010).

Tendencia negativa a pesar depuración; sinergias cHABs y cambio climático (Kosten et al., 2012).



Factores dinámica fitoplancton



Nutrientes y susceptibilidad

Fósforo como macronutriente limitante *(Schindler 1977)*

Zona silícea. Oeste peninsular, donde afloran restos de macizos antiguos. Sus suelos están formados por rocas con bajo contenido en calcio como el granito, pizarras y cuarcitas.

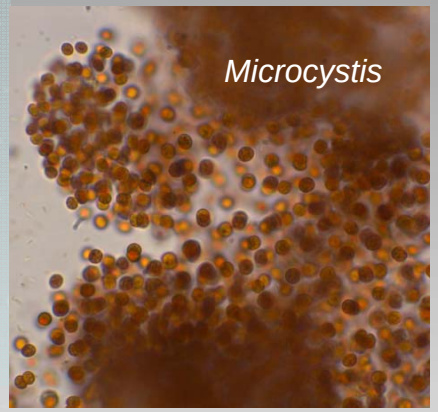
Zona arcillosa. Se extiende por las grandes cuencas sedimentarias de ambas submesetas y los valles del Ebro y del Guadalquivir, donde se han ido depositando materiales como las arcillas y margas, dando lugar a amplias llanuras.

Zona caliza. Forma una "Z" invertida en el este peninsular. La componen rocas como la caliza, cuya erosión da lugar al paisaje kárstico, las areniscas y los conglomerados.

Rocas y cenizas volcánicas. Origen volcánico de las islas Canarias.

Las cianobacterias

- Procariontes fotosintéticos muy antiguos (2,4 Ga): O_2 atmósfera. Precursores cloroplastos de algas y plantas superiores.
- Algunas especies pueden producir metabolitos secundarios bioactivos (cianotoxinas): Hepatoxinas, neurotoxinas, citotoxinas, dermatotoxinas y endotoxinas. Misma especie cepas productoras y no productoras (e.g. Paerl & Otten, 2010).
- 10 géneros potencialmente tóxicos en las aguas continentales españolas *(Cirés & Quesada, 2011)*. Con más amplia distribución en Europa: *Microcystis*, *Anabaena* (actualmente *Dolichospermun*) y *Aphanizomenon*.
- Casos bien documentados de intoxicaciones *(Codd et al., 2005; De Hoyos, 2008)*. Relación entre exposición crónica subletal y cáncer de hígado *(Quesada, 2003)*.

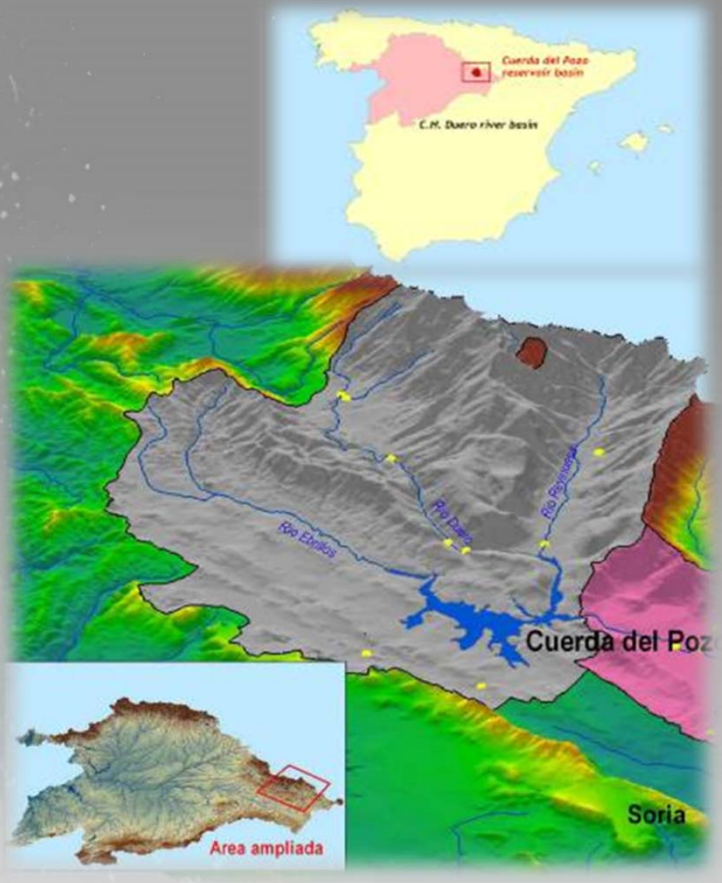


Presentación

- Problema ambiental: Eutrofización y cianobacterias
- Caso de estudio: Embalse de La Cuerda del Pozo (Soria)
- Proyecto
  - Carencias y retos
  - Principales objetivos y enfoque

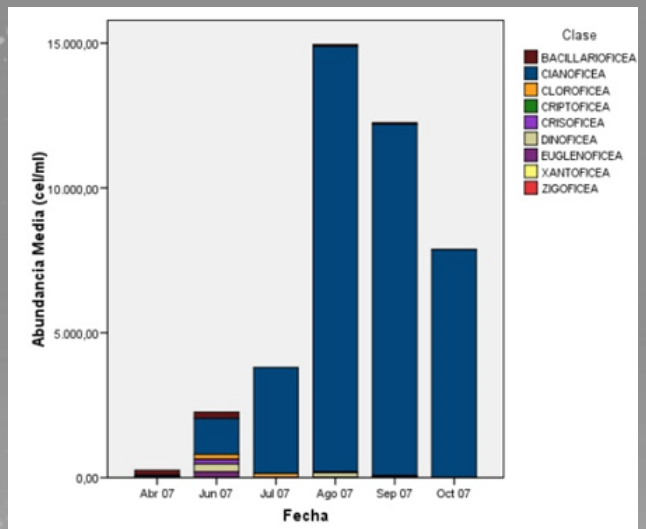
Caso de estudio: Embalse de La Cuerda del Pozo (Soria)

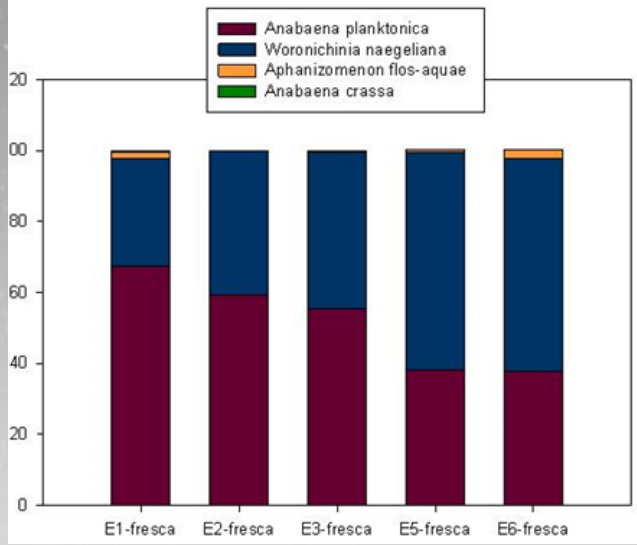
- Cuenca de drenaje (550 km^2) escasamente poblada (~8.500 hab invierno y 22.000 hab verano) y dominada por bosques de pinos. Clima mediterráneo frío.
- Actividad turística y ganadera (1.200 UGM) alrededor del embalse y en la cuenca (casi 6.000 en total).
- Población más relevante Vinuesa, que vierte aguas residuales a escasos metros del embalse). Tiene 1.000 hab. (5.000 en verano) y plantas industriales pequeñas.
- Tres zonas de baño con importante afluencia de usuarios en el mes de agosto.



Estudios previos de la CHD

- Existen concentraciones elevadas de cianobacterias en diferentes momentos del año y lugares del embalse. Dominan siempre el fitoplancton.
- Relatados cHABs desde 1998, no todos los años. En agosto de 2009 el baño fue temporalmente restringido debido a una importante proliferación de cianobacterias.
- Hay al menos 4 especies diferentes de cianobacterias potencialmente tóxicas.
- En 2010 otros estudios toxicológicos (Quesada, com. pers.) detectaron cilindrospermopsina (CYN) en bajas concentraciones, que es una potente cianotoxina (Brient et al., 2008).





a1 CYN causes irreversible inhibition of protein synthesis in humans while interacting with transfer RNA (Froscio et al., 2003; Kinear et al., 2008). It is genotoxic (Humpage et al., 2000) and probably carcinogenic (Falconer et al., 2006). The primary symptoms described are gastroenteritis, and pathological affects on the kidneys, heart, thymus, spleen, and intestine (Brient et al., 2008). For instance, CYN poisoning was responsible for the Palm Island Mystery Disease (Griffiths and Saker, 2003), a severe hepatitis-like illness affecting 148 people that occurred in 1979 on Palm Island (Queensland, Australia).

agustin; 03/02/2016

Presentación

- Problema ambiental: Eutrofización y cianobacterias
- Caso de estudio: Embalse de La Cuerda del Pozo (Soria)
- Proyecto
  - Carencias y retos
  - Principales objetivos y enfoque

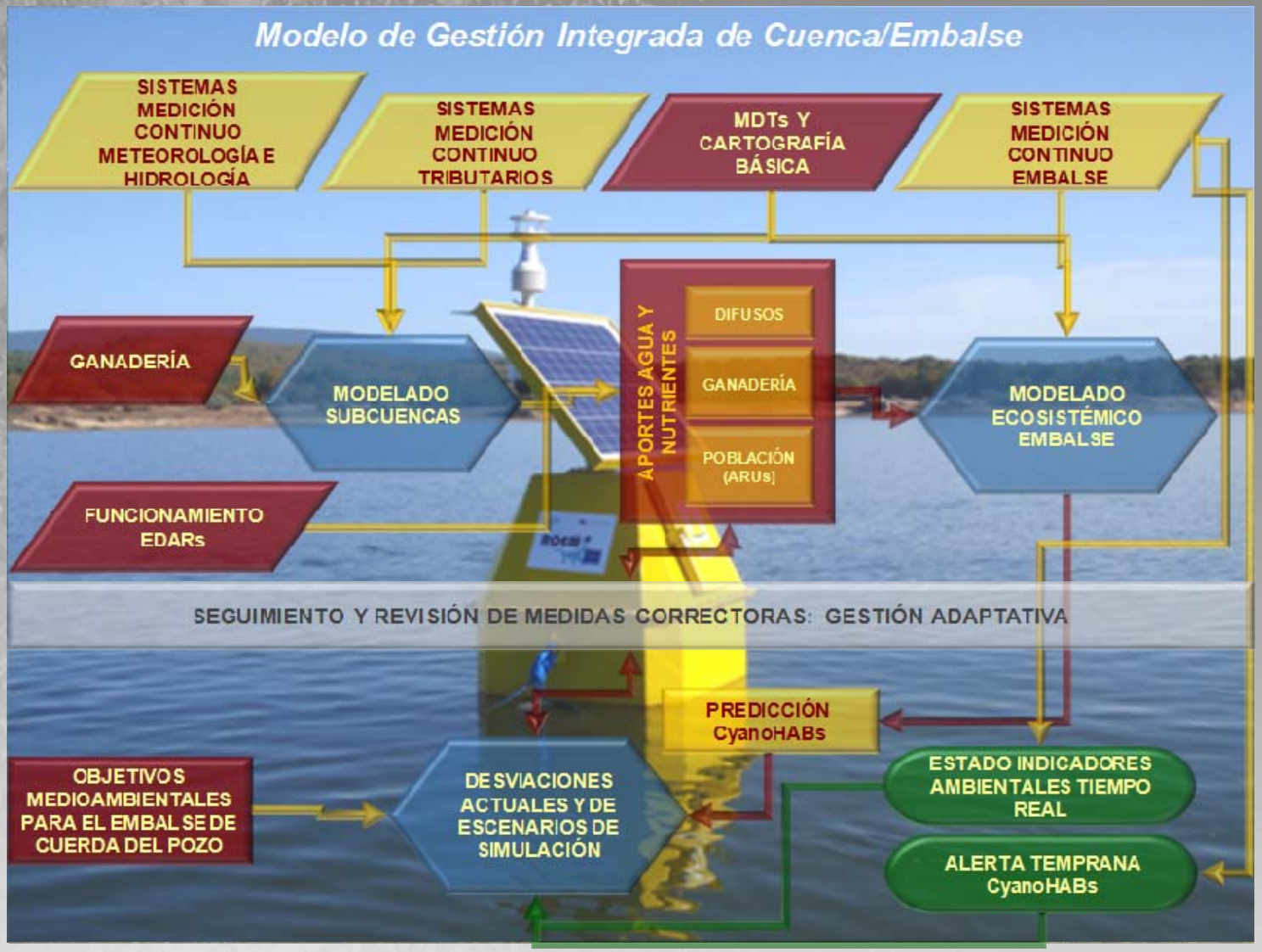
Carencias y retos

- En embalses la dinámica es diferente a los lagos y se ha fracasado en predecir cHAB estivales a partir de P; otros factores limitantes, luz, hidrodinámica distorsionan la respuesta (Anderson & Glibert, 2002).
- Análisis de calidad de las aguas se realizan mediante la recolección de una muestra y su posterior análisis en el laboratorio. Proceso lento y caro, inadecuado para detectar eventos de contaminación de vida corta (Yang et al., 2002) y para la detección temprana de cHABs.
- No información suficiente para comprender procesos y relaciones causales en un cuadro tan complejo, con interacción de la hidrodinámica y ecofisiología de las cianobacterias e influencia del cambio climático.
- Grandes inversiones en sistemas de depuración con resultados desconocidos e inciertos en riesgos de cHABs.
- Necesidad de comprender y simular para evaluar escenarios y optimizar medidas correctoras.

Objetivos

- Avanzar en la captura funcional de procesos y variables determinantes en eutrofización y riesgo de cHAB, y aportar herramientas que contribuyan a la investigación y gestión optimizada y adaptativa del problema.
  - Infraestructura remota de monitorización de alta frecuencia (servicios futuros de investigación y gestión).
  - Sistema detección temprana y seguimiento de cHABs.
  - Simulación dinámica del ecosistema: Investigación de procesos, aprendizaje de interacciones relevantes.
  - Ensayo de escenarios de actuaciones correctoras sobre el riesgo de cHAB.

Planteamiento general



Contenidos de la exposición

- Presentación
  - Introducción al problema ambiental
  - Presentación del proyecto
- Desarrollo
  - Métodos
  - Resultados
  - Discusión
- Conclusión

Desarrollo

Metodología

Ciberinfraestructura

- Estaciones de monitorización
- Sensor biomasa cianobacterias
- Sistema de información

Muestreos y análisis de laboratorio

Modelado de la cuenca de drenaje

Modelado del embalse

Ciberinfraestructura (CI)

- Sistema de monitorización remota y autónoma en tiempo cuasi-real, y más:

  Soporta adquisición avanzada de datos, su almacenamiento, integración, curación y visualización, y otros servicios de computación y de información (p.e. simuladores), generalmente distribuidos a través de internet y en diferentes grupos o instituciones (Bottum et al., 2008).

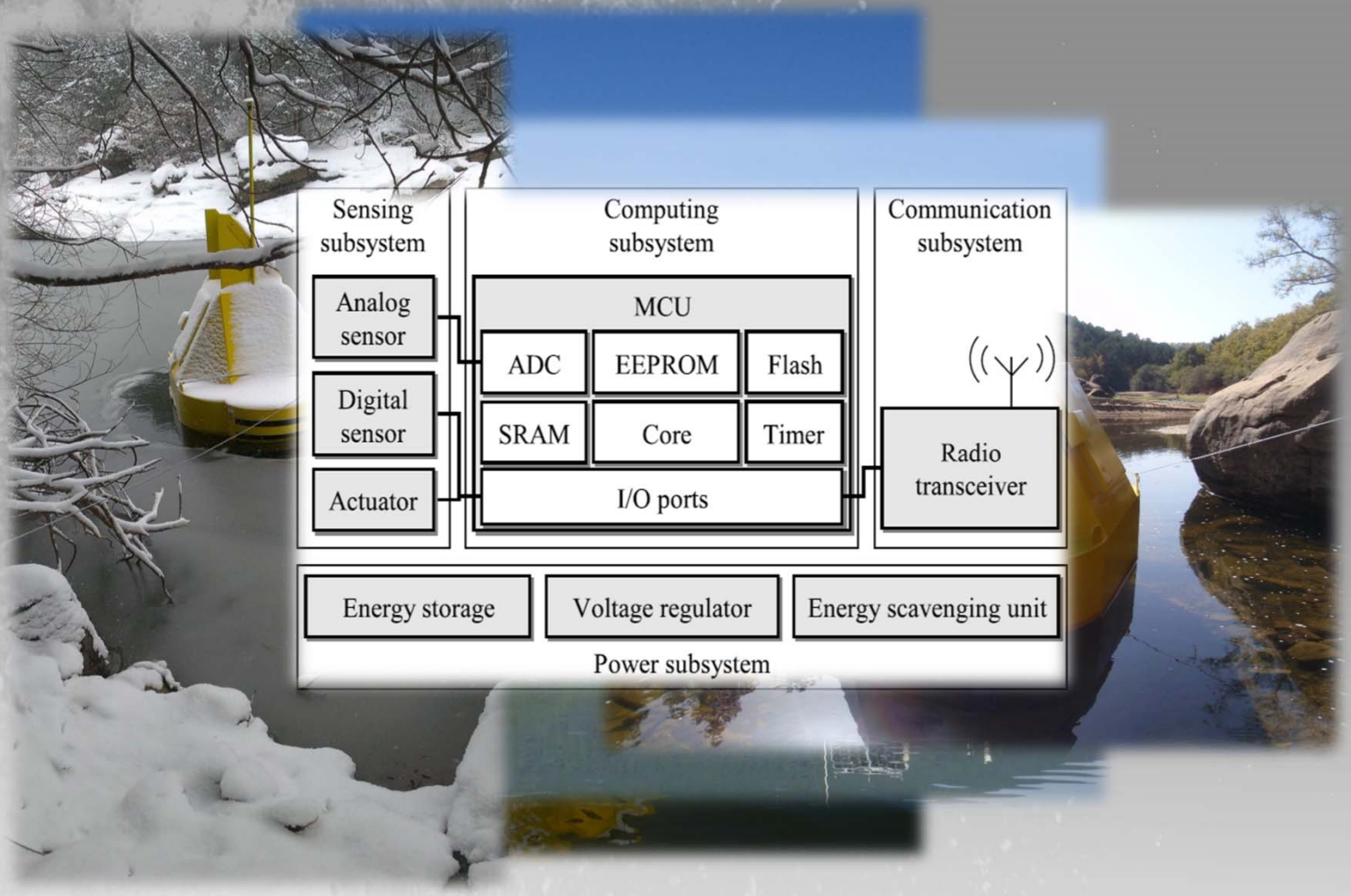
- Tendencia creciente: Aplicaciones de registros de alta frecuencia (HFM) a la limnología (Meinson et al., 2015) y otros sistemas de observación remota para evolución en tiempo real a gran escala (GLEON). Algunas iniciativas en embalses OLARIS (Ducas, 2005), Rappbode (Rinke et al., 2013), Tres Gargantas (Ye, 2014).
- La CI de Cuerda del Pozo nació y se desarrolló en proyectos Europeos DORII (*Deployment of Remote Instrumentation Infrastructure*) y Life ROEM+ sobre gestión de la eutrofización en embalses de la cuenca del Duero.

Estaciones de monitorización

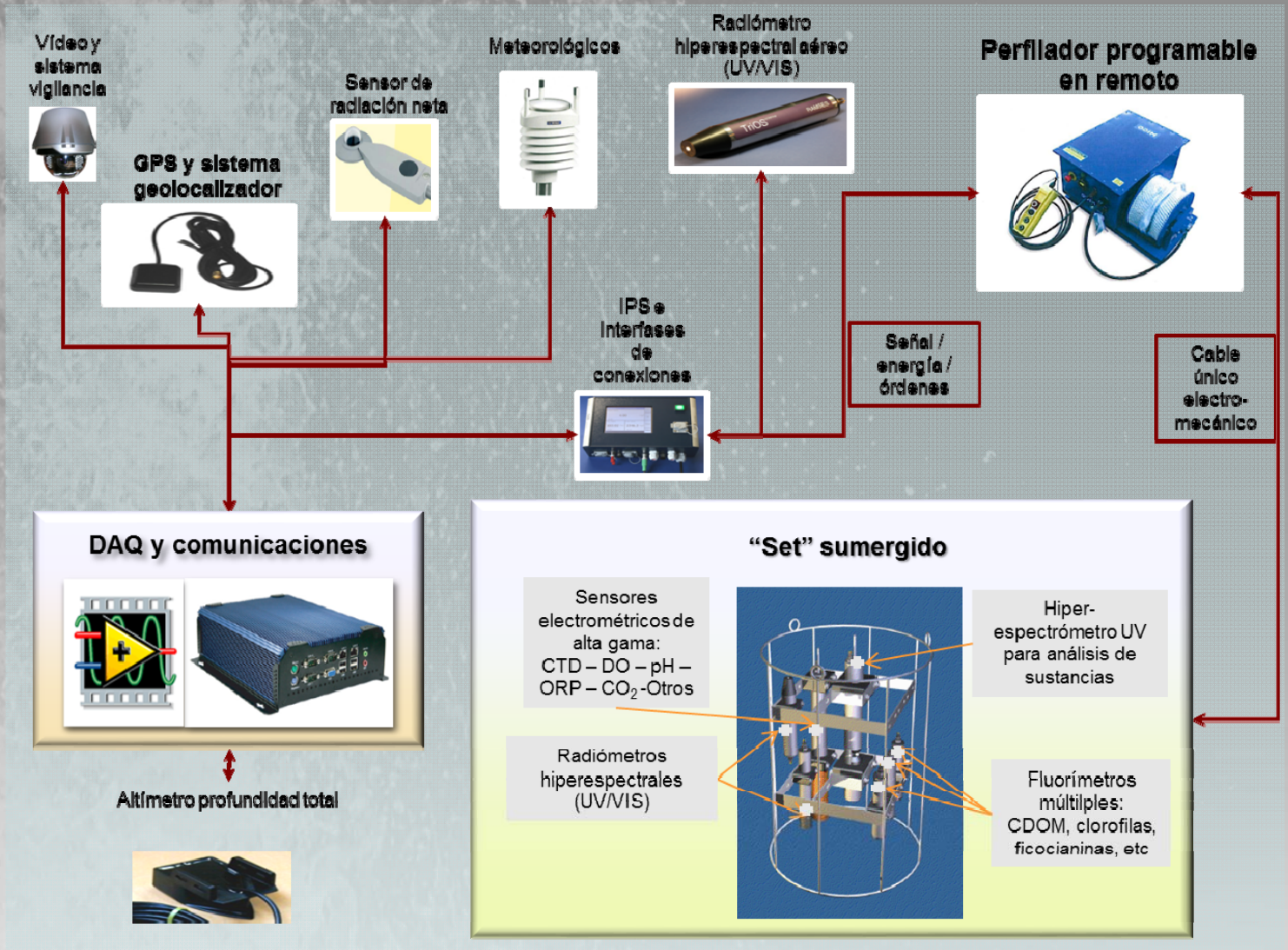
110 variables, 50% primarias registradas *in situ* y 50% derivadas

- Meteorología
- Radiación solar
- Físico-química aguas
- Hidroquímica
- Hidrobiología

Estaciones de monitorización (II)

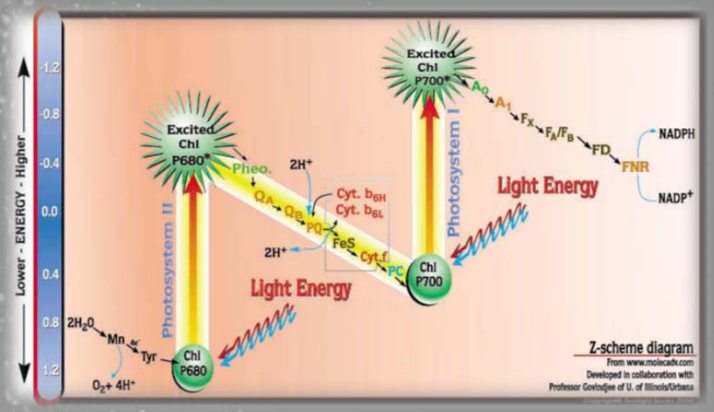


Estación perfiladora central



Biomasa de cianobacterias

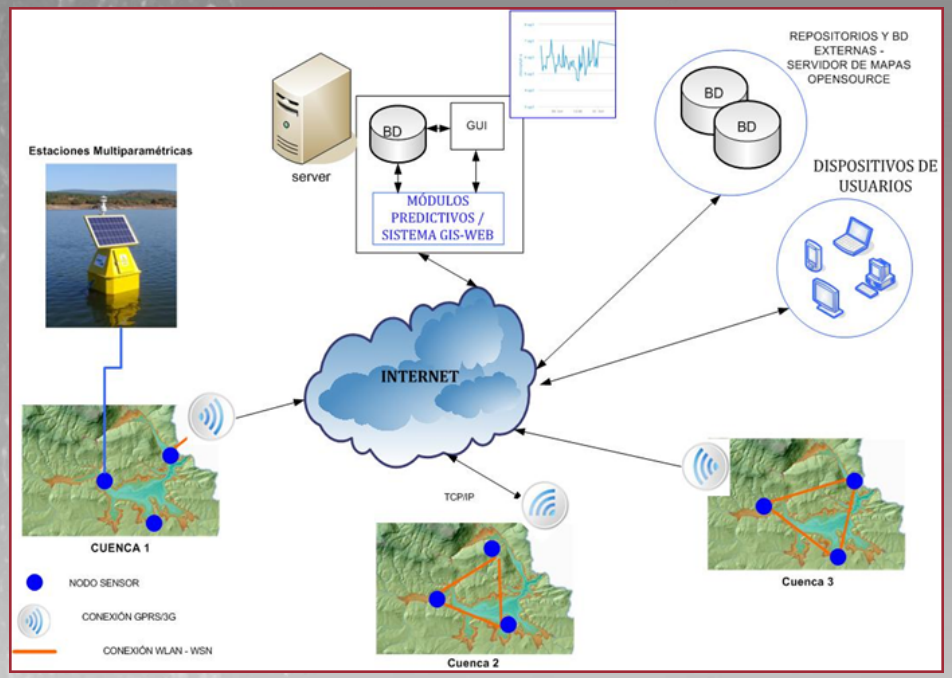
- Fluorescencia de clorofila (método estándar) mal indicador. 80-90% clorofila en cianos está en PSI, que no es fluorescente.



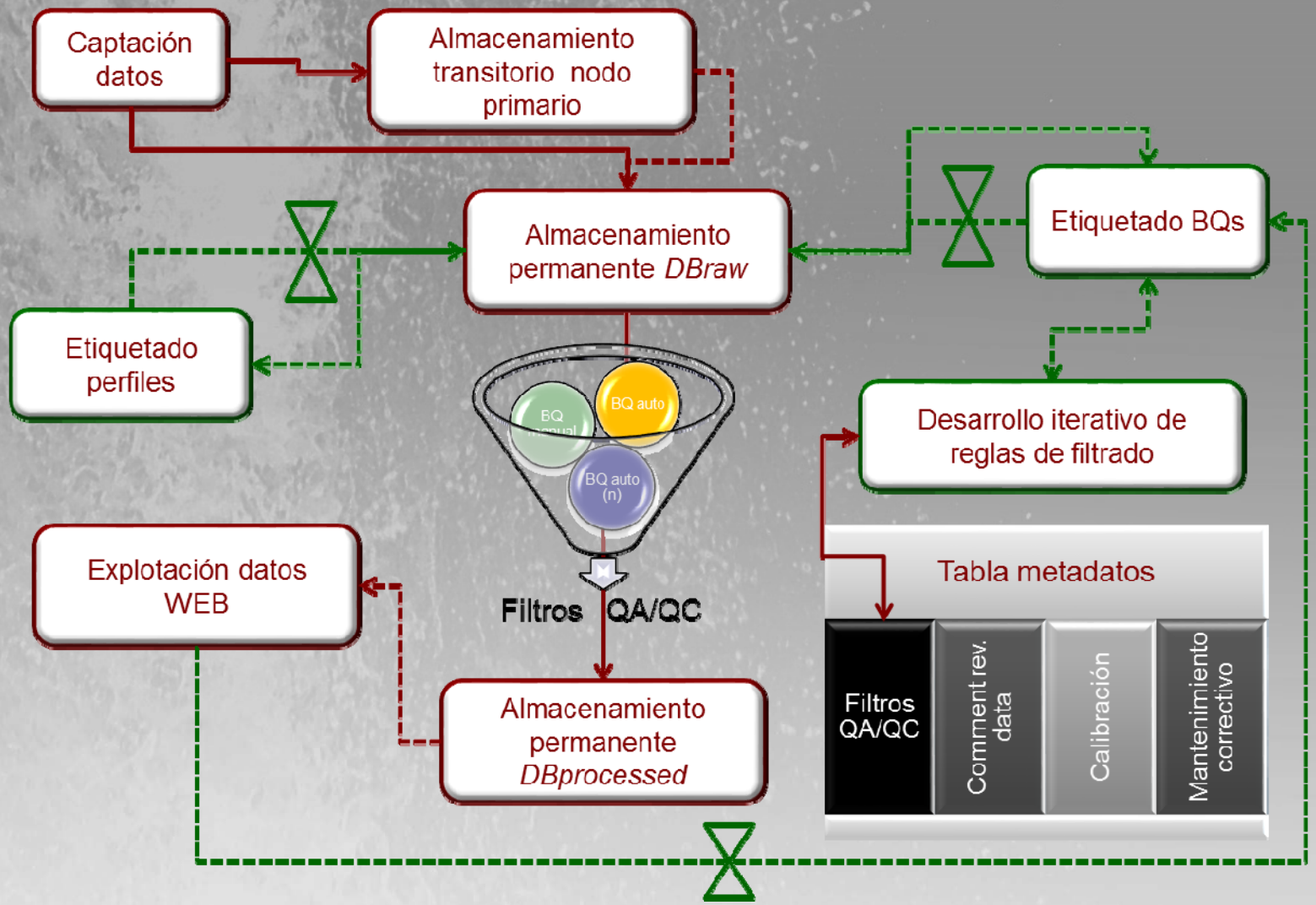
- Estimación de biomasa de cianobacterias mediante fluorescencia de pigmentos específicos: ficocianinas Sensor excita la ficocianina, pigmento dominante de la antena de las cianobacterias a una longitud de onda de 620 nm. La emisión de fluorescencia se detecta a 655 nm.
- Ficocianinas como variable proximal en sistema de alerta: Función específica de transformación a biovolumen de cianobacterias.

Sistema de información

- Flujo información bidireccional (control remoto).
- Servidor principal aloja bases de datos y programas de procesado, predicción y visualización.
- Alimenta un sistema Web-GIS (*Geographic Information System*) cumple estándares internacionales de OGC (*Open Geospatial Consortium*) denominados *Sensor Web Enablement* (SWE), específico datos sensorización.



Gestión de datos

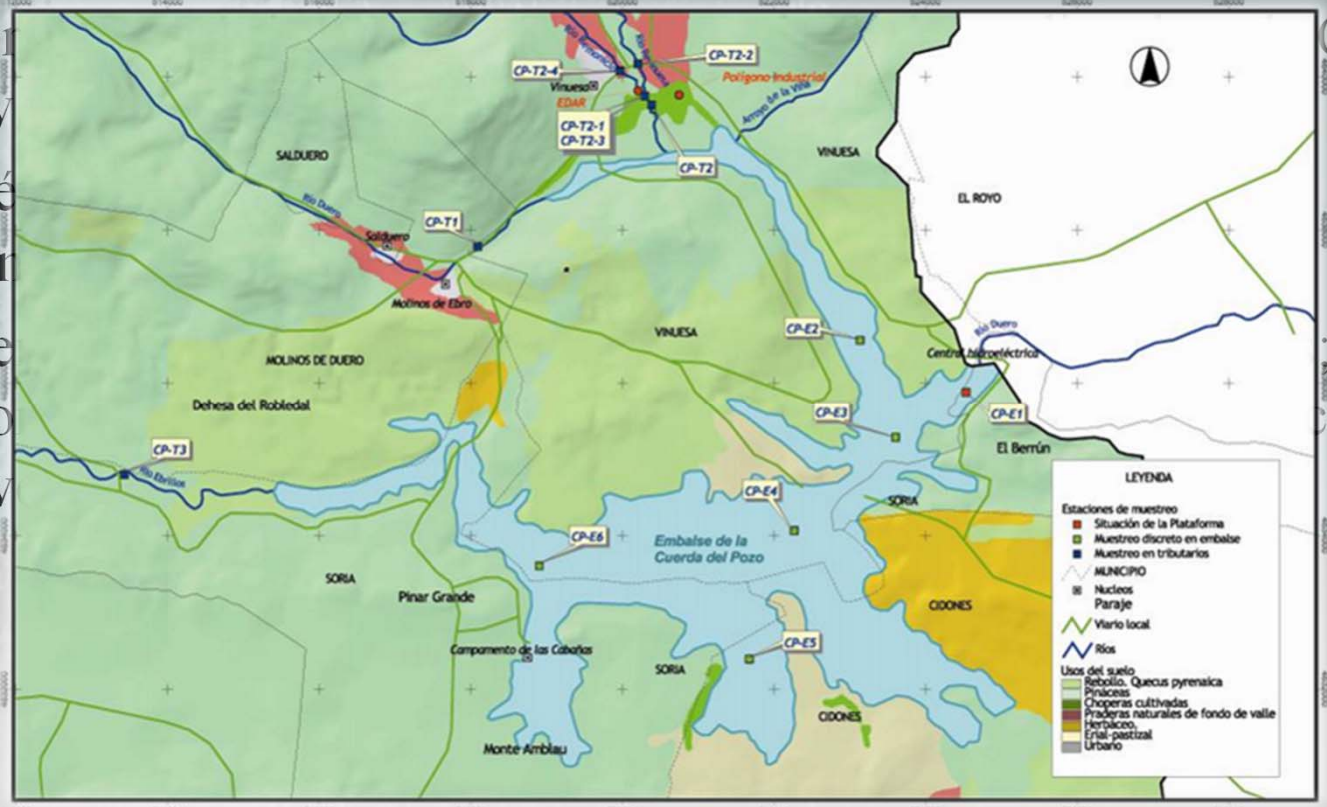


Desarrollo

- Metodología
  - Ciberinfraestructura
  - Muestreos y análisis de laboratorio
    - Muestreos limnológicos
    - Sedimentos
  - Modelado de la cuenca de drenaje
  - Modelado del embalse

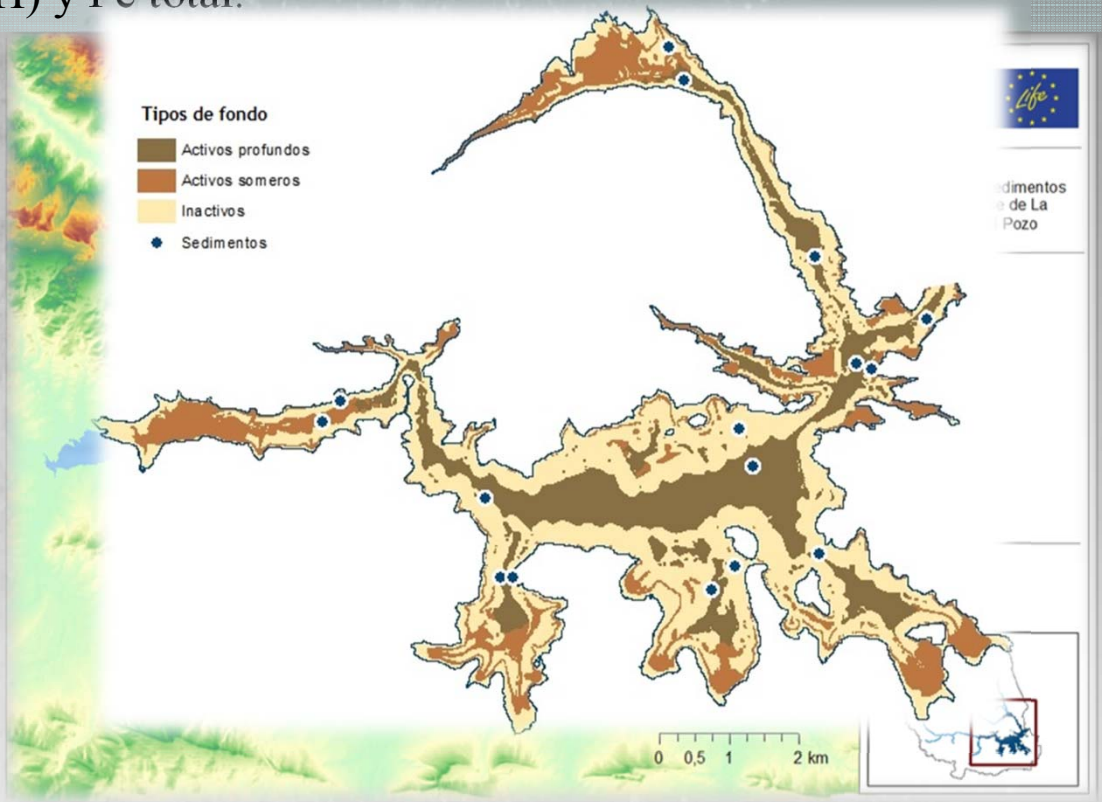
Muestreos limnológicos

- Dos ciclos principales de muestreo en embalse (agua y sedimentos) y ríos tributarios: 2010/11 (2.691 datos) y 2014/15 (1.718 datos). Frecuencia quincenal/mensual.
- Fo C, N, P y
- Mé co
- Ide bio a inv



Sedimentos

- Generación de mapas de sectores homogéneos para cada variable, integrando datos analíticos con cartografía de profundidades, pendiente y facies hidrodinámica



Desarrollo

- Metodología

  Ciberinfraestructura

  Muestreos y análisis de laboratorio

  Modelado de la cuenca de drenaje

  - Generación de subcuencas de análisis
  - Submodelo hidrológico
  - Submodelo de nutrientes
  - Submodelo de excreción de peces

  Modelado del embalse

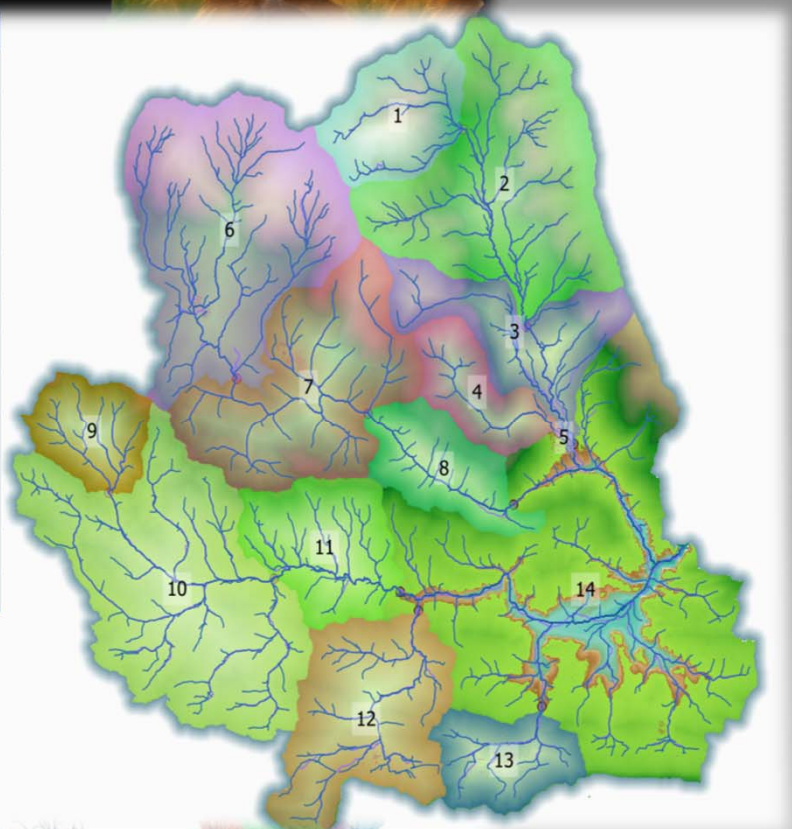
Subcuencas de análisis

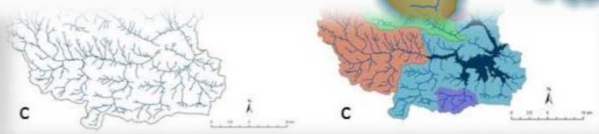
Modelo topobatimétrico digital (5m x 50 cm) integrando topografía de vuelo Lidar (IGN) y batimetría (sondeo hidroacústico elaboración propia)

Herramientas hidrológicas en GIS:

- Red hidrográfica sintética digital
- Generación de límites de subcuencas de análisis

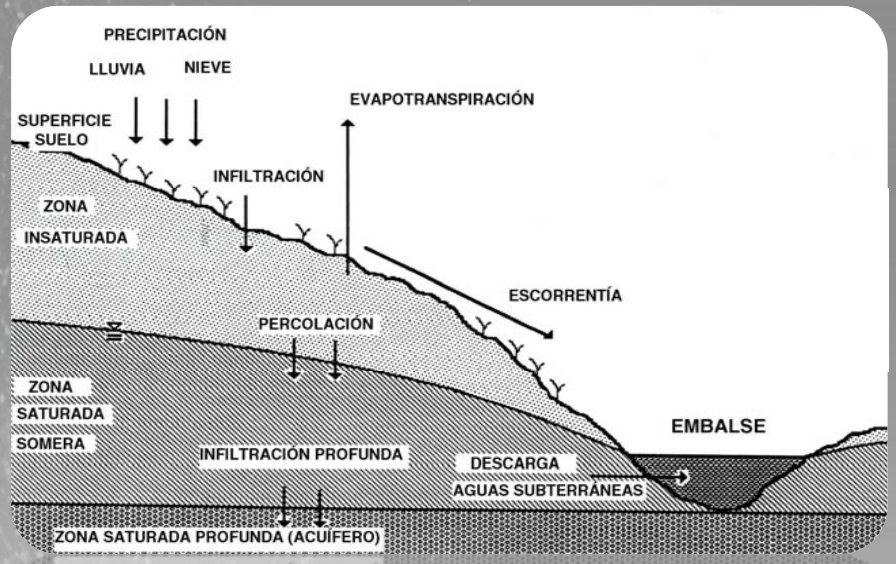
ID	Nombre	AREA (Ha)
1	Revinuesa	2.142
2	Revinuesa	6.003
3	Revinuesa	2.530
4	Remonicio	1.397
5	Remonicio	13
6	Duero	6.720
7	Duero	4.878
8	Duero	1.810
9	Ebrillos	1.569
10	Ebrillos	7.249
11	Ebrillos	2.495
12	Dehesa	3.812
13	Bajero	1.615
14	CED	12.390





Modelo aportación nutrientes

- Funciones de Carga Generalizadas a la Cuenca (GWLF) sobre red sintética fluvial. Adaptada a GIS (Mapshed) y mejorada (Evans & Corradini, 2012).
- Modelo hidrológico espacialmente distribuido y resolución diaria, sobre el que aplican coeficientes de exportación de nutrientes por unidades de uso del suelo y tasa de pérdida en tránsito.



- Aportación de fracción sólida (erosión y sedimento)
- Escorrentía urbana
- Fracción disuelta aguas escorrentía
- Precipitación directa al embalse

Evaluación de fuentes de aportación de nutrientes

Baño de población

- Cantidad de fósforo por evento de baño y persona: 1,6 mg (Judd and Bullock, 2003).
- Aplicable a julio y agosto, el resto del año es cero.
- Usuarios playas estimados: 1375 hab. Se asume que la mitad se baña una vez al día y se intensifica durante el fin de semana.

Desarrollo

Metodología

Ciberinfraestructura

Muestreos y análisis de laboratorio

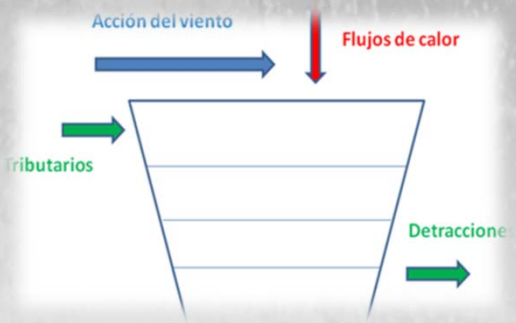
Modelado de la cuenca de drenaje

Modelado del embalse

- Modelo 1DV
- Modelo 3D
- Modelo excreción carpas

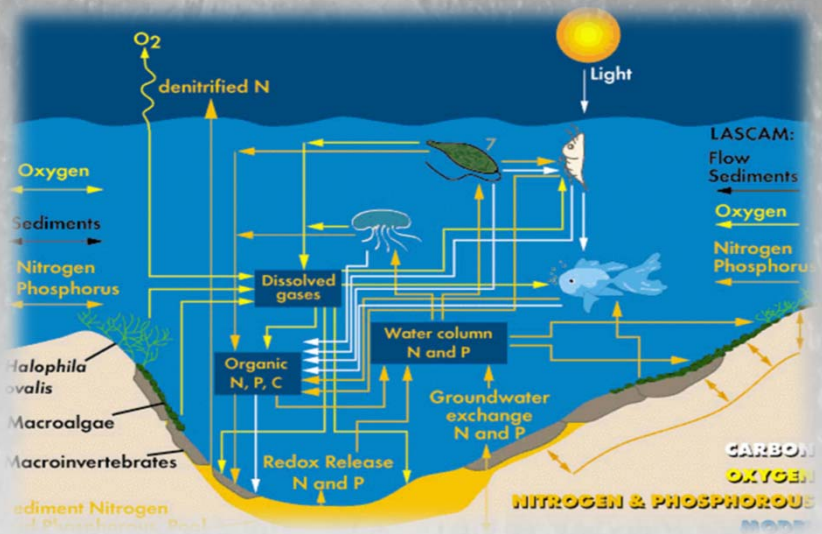
Modelo 1DV: Hidrodinámico

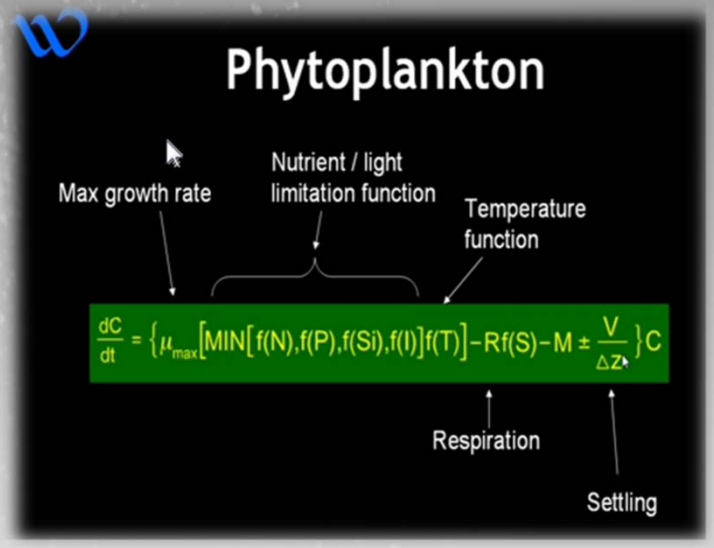
- DYRESM es un modelo unidimensional (1DV) que permite predecir la distribución vertical de temperatura, salinidad y densidad en lagos y embalses (Imerito, 2007).
- Esquema de capas lagrangiano, serie de capas horizontales de propiedades uniformes pero espesor variable.
- Los principales procesos que contempla son:
  - Intercambios de calor, momento y masa en la superficie
  - Mezcla superficial (domina el viento)
  - Dinámica flujos de entrada
  - Mezcla en profundidad (rotura estratificación)



Modelo 1DV: Biogeoquímico

- CAEDYM (Herzfeld & Hamilton, 2000) se acopla dinámicamente con DYRESM para simular (serie de ecuaciones diferenciales parciales) concentraciones de nutrientes y de diferentes grupos del fitoplancton (opciones de cinética: Monod y Droop).
- Crecimiento del fitoplancton depende de función específica de los factores limitantes: Luz, N, P o Si en diatomeas. La f(N,P,Si,I) que resulta limitante y una función de T, modulan tasa de crecimiento máxima. a2





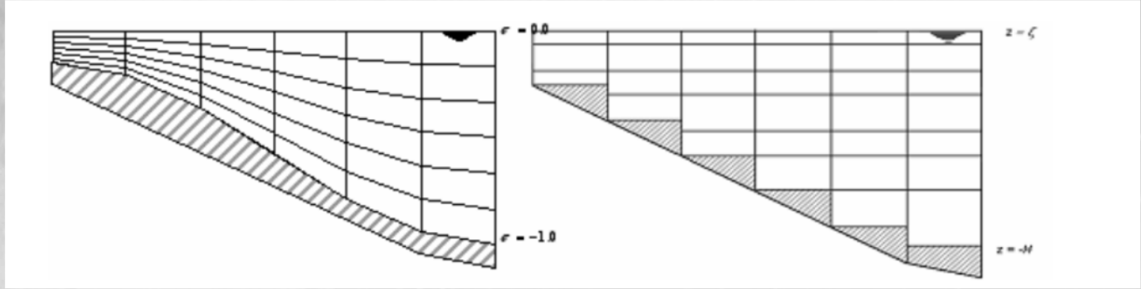
Diapositiva 34

a2 El crecimiento de cada grupo del fitoplancton depende de una función de dependencia específica de los factores limitantes (luz, N, P o Si en diatomeas). El factor que resulta en un valor mínimo de esa función y una función de la T, modulan la tasa de crecimiento máxima

agustin; 04/02/2016

Modelo 3D: Hidrodinámico

- Delft3D-FLOW (Deltares, 2011). Flujo y transporte que resuelve las ecuaciones no lineales 3D para aguas someras (ecuaciones de *Navier-Stokes* para fluido incompresible. No aceleración vertical).
- Opción Z fija el espesor de cada capa, adecuada cuando interesan procesos asociados a gradientes verticales acusados (termoclinas).
- Celdas de 40 m de lado y 1 m de espesor.
- Calibrado: Ajustes principales en rugosidad, viscosidad, viento y solución de intercambio de calor.



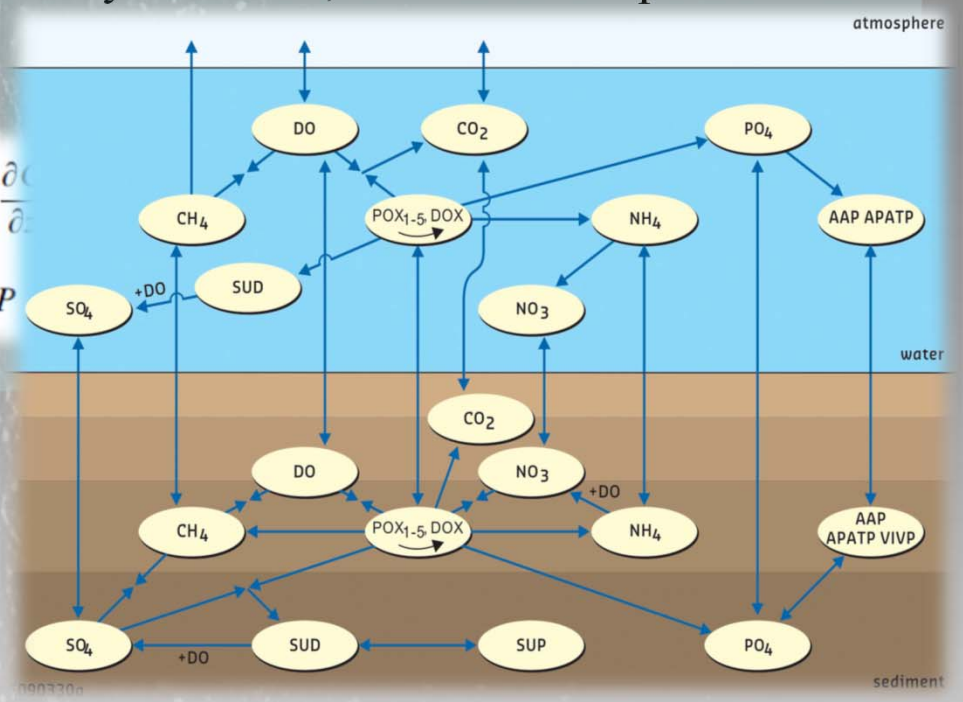
Modelo 3D: Biogeoquímico

Módulos aplicados en Cuerda del Pozo:

- Crecimiento, mortalidad del fitoplancton
- Extinción de la luz
- Descomposición de la materia orgánica
- Nitrificación, desnitrificación
- Adsorción y precipitación de fosfato
- Disolución del silicato opal
- Reaireación del oxígeno disuelto
- Sedimentación neta de componentes particulados (sin resuspensión)

Delft3D-ECO (Smits et al., 2013). Se acopla dinámica al Delft-FLOW. Integración numérica de ecuaciones de conservación de la masa. Resuelve ecuaciones 3D de advección, difusión y reacción, en malla computacional de volúmenes finitos:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u\frac{\partial C}{\partial x} - v\frac{\partial C}{\partial y} - w\frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_v\frac{\partial C}{\partial z}\right) + S + P$$



Modelo excreción carpas

- Mortandad de carpas de gran tamaño (> 5 años) en septiembre 2015. Recogidas unas 120 t (extracción neta de biomasa).
- Sugirió posible relevancia de efecto de bombeo de nutrientes desde sedimentos a columna de agua (Morgan & Hicks, 2013).
- Lenguaje de sistemas dinámicos - *STELLA_Pro v. 1.0.3 (Isee Systems, Ltd.)*. Diferencias finitas (método de Euler).
- Relación de tasa específica de excreción (Pe en g/g/d), corregida con dependencia metabólica de temperatura del agua, con peso húmedo del pez (mediante función potencial)

$$\ln\left(Pe^{E/kT}\right) = \ln(P_0) + b\ln(M)$$

Contenidos de la exposición

- Presentación
  - Introducción al problema ambiental
  - Presentación del proyecto
- Desarrollo
  - Métodos
  - Resultados
  - Discusión
- Conclusión

Desarrollo

- Resultados

  Ciberinfraestructura: Monitorización

  - Resumen de explotación
  - Destacados de plataformas

  Nutrientes y cianobacterias

  Modelado de la cuenca de drenaje

  Modelado del embalse

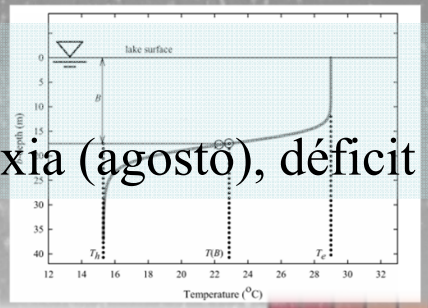
Explotación de ciberinfraestructura

- Plataforma perfiladora central, desde abril de 2010.
  - 110.000 registros (23.000 de perfilado) x 16 variables limnológicas y 6 calculadas.
  - 380.000 datos válidos, después de curación de datos.
- Boyas cianobacterias (x2), desde noviembre de 2014.
  - 8.500 datos válidos cada una (4 variables limnológicas).
- Plataforma río Duero, desde noviembre de 2014.
  - Unos 8.000 registros válidos (7 variables limnológicas).

Plataforma perfiladora

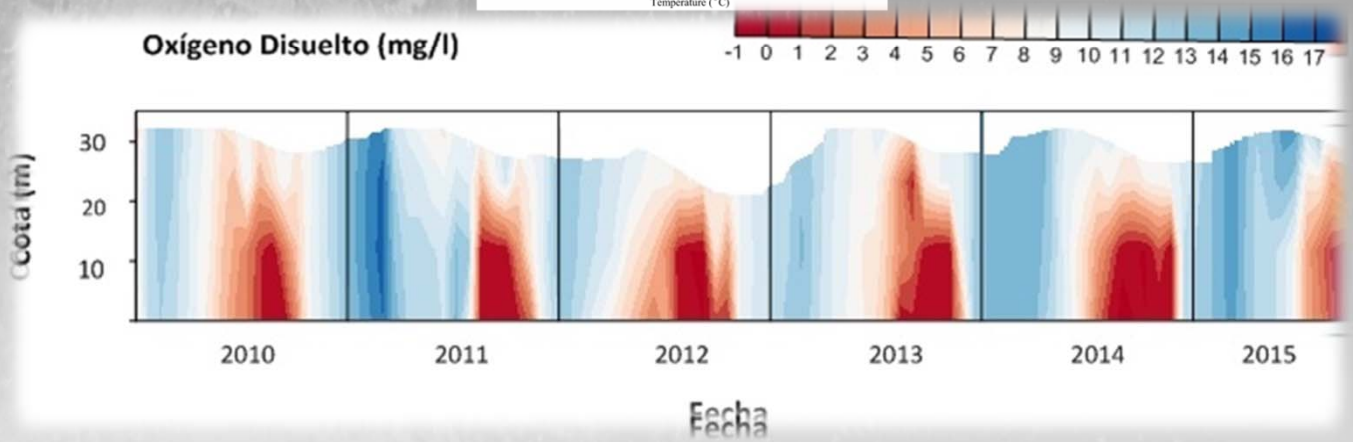
- Temperatura
  - T. media en zona superficial de 2,8 a 25,2 °C y máximo en 2015.
  - Estratificación térmica prolongada (abril a noviembre). 9,5 m de profundidad en promedio, metalimnion muy desarrollado (6 m).

- Oxígeno disuelto
  - Hipoxia (junio), anoxia (agosto), déficit generalizado (octubre).



$$T(z) = T_h + \frac{T_e - T_h}{\left(1 + (\alpha Z)^n\right)^{-\frac{1}{n}}}$$

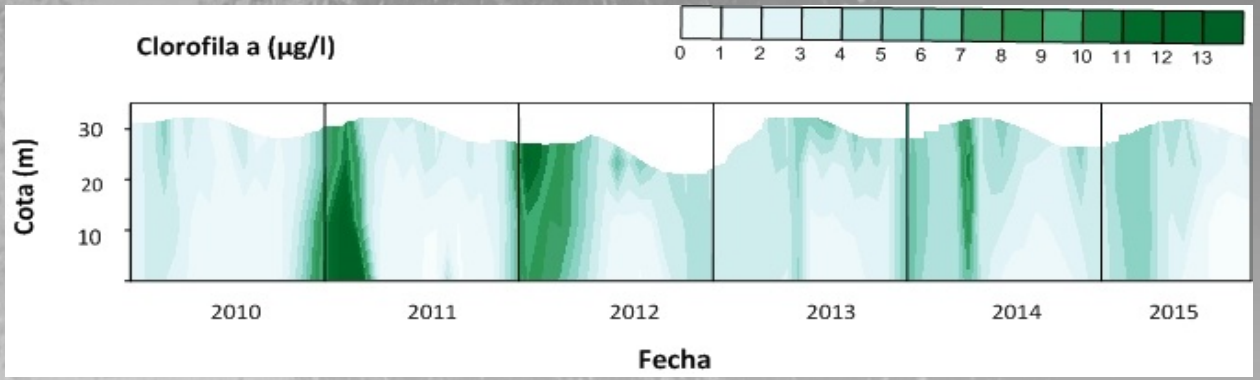
α= Parámetro que ajustar la curva (en m-1) .Determina la profundidad del gradiente máximo de temperatura.
n = parámetro adimensional que controlan la pendiente del [illegible]
Te = temperatura del epilimnion.
Th = temperatura del hipolimnion.
Z = Medidas de la profundidad (variable independiente).

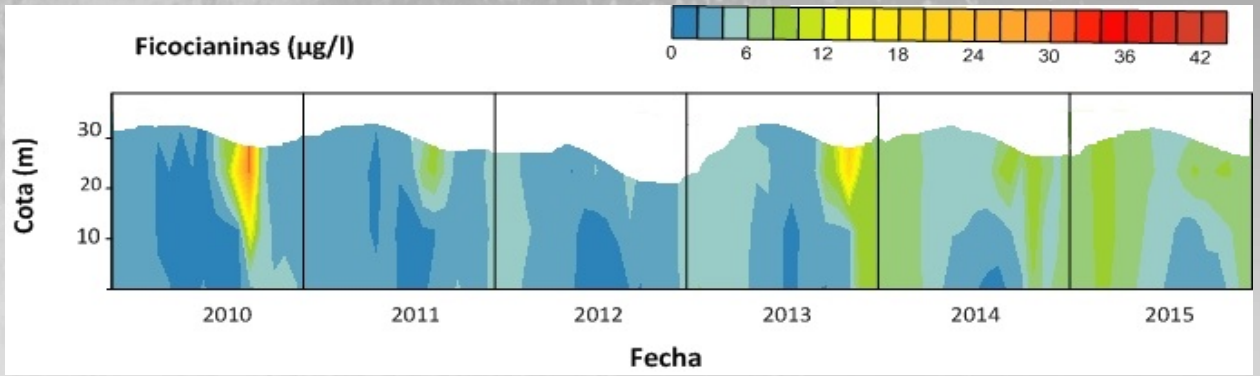


Plataforma perfiladora (II)

Clorofila *a* (biomasa de fitoplancton): Desarrollos clorofíceas invernales (2011 y 2012) y diatomeas primaverales (2014)

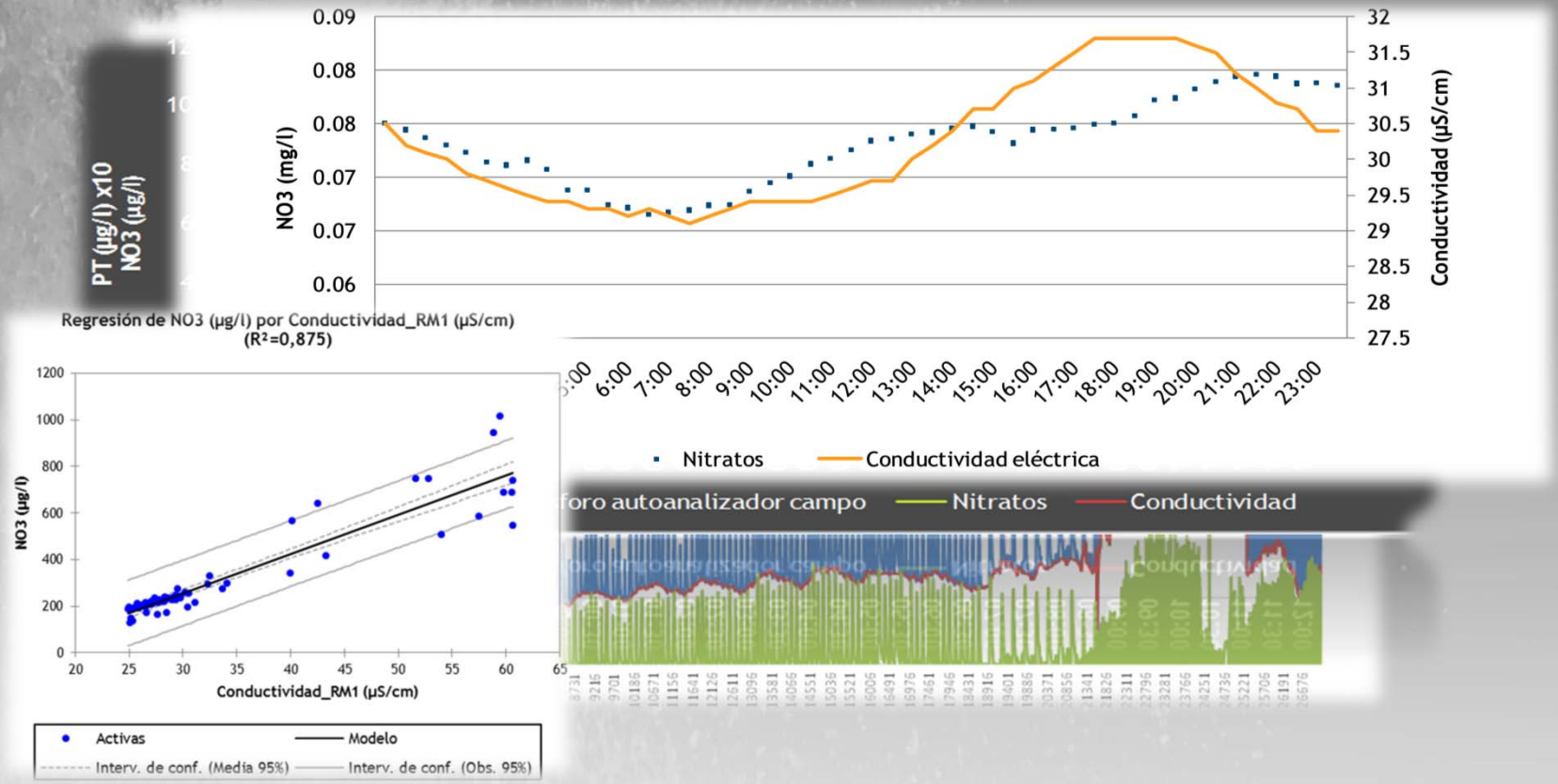
Ficocianinas (biomasa de cianobacterias): cHABs en 2010 y 2013, siempre en septiembre-octubre





Retroasignación vertido EDAR

- En temporada baja se diluye, periodo diario de muy baja fluctuación pero que el sistema es capaz de trazar



Desarrollo

- Resultados
  - Ciberinfraestructura: Monitorización
    - Resumen de explotación
    - Destacados de plataformas
  - Nutrientes y cianobacterias
  - Modelado de la cuenca de drenaje
  - Modelado del embalse

Nutrientes en el embalse

- Concentraciones siempre en rango bajo (<380 µg_N/l de TIN y <22 µg/l de TP). Valores medios en rango de oligotrofia.
- Mínimo de TIN en junio y submínimo en octubre.
- SRP permanentemente en rangos que podría ser limitantes (3-10 µg/l, según Kolzau et al., 2014).
- Ratios que pueden indicar limitación:
  - N en primavera y octubre (NT/TP<22).
  - Si en verano (Si/TP<29), solo en brazo norte del Duero y presa.

ESTACIÓN	FECHA	TIN µg N/l	TON µg N/l	NO3 µg N/l	NO2 µg N/l	NH4 µg N/l	TIN µg N/l	TP µg P/l	TDP µg P/l	SRP µg P/l	TPP µg P/l	Si mg/l	TN/TP	TIN/TP	SI/TP
E1	PROMEDIO	**175**	**757**	**84**	**3**	**89**	**175**	**12**	**7**	**2**	**5**	**1.3**	**78**	**15**	**108**
	4/15/2010	278		164	4	110	278	12	7	3	4	1.3	24	24	115
	5/12/2010	340		128	2	210	340	10	10	2	0	1.4	33	33	140
	7/22/2010	143	790	101	2	40	143	11	5	1	6	1.2	88	13	109
	8/25/2010	210	557	91	8	110	210	16	7	1	9	1.2	48	13	77
	9/22/2010	144	923	71	2	70	144	12	8	2	4	1.3	91	12	113
	10/7/2010	64		4	0	60	64	12	6	1	6	1.2	5	5	98
	6/22/2010	25		1	1	23	25	12	5	1	6	1.3	2	2	110
E2	PROMEDIO	**151**	**626**	**79**	**3**	**69**	**151**	**13**	**7**	**2**	**6**	**1.3**	**65**	**11**	**97**
	4/15/2010	265		148	4	113	265	12	8	3	4	1.4	22	22	115
	5/12/2010	112		91	1	20	112	11	10	2	1	1.5	9	10	127
	7/22/2010	153	947	131	3	20	153	11	5	1	6	1.2	92	14	110
	8/25/2010	296	354	103	8	185	296	8	6	2	2	1.1	54	38	143
	9/22/2010	123	577	44	4	75	123	18	8	2	10	1.3	58	7	73
	10/7/2010	55		4	1	50	55	22	9	2	13	1.2	5	3	56
	6/22/2010	15		1	1	13	15	15	6	2	9	1.3	1	1	84
E3	PROMEDIO	**158**	**314**	**87**	**3**	**68**	**158**	**11**	**7**	**1**	**4**	**1.3**	**39**	**14**	**120**
	5/12/2010	214		131	3	80	214	12	11	2	1	1.4	18	17	114
	7/22/2010	143	207	115	4	25	143	8	5	1	4	1.3	29	17	149
	8/25/2010	281	319	124	8	150	281	8	7	1	1	1.3	50	36	168
	9/22/2010	183	417	105	3	75	183	12	7	2	5	1.4	50	16	117
	10/7/2010	52		2	0	50	52	15	7	0	8	1.2	4	3	78
	6/22/2010	23		1	1	20	23	13	6	1	7	1.4	2	2	106
E4	PROMEDIO	**184**	**998**	**96**	**3**	**85**	**184**	**10**	**6**	**1**	**4**	**1.3**	**98**	**19**	**135**
	7/22/2010	162	988	119	3	40	162	9	4	1	5	1.2	96	17	127
	8/25/2010	297	1103	129	8	160	297	6	5	1	1	1.3	117	53	225
	9/22/2010	188	809	125	3	60	188	10	6	1	4	1.5	83	19	149
	10/7/2010	43		3	0	40	43	12	6	0	6	1.2	4	4	98
	5/11/2010	325		153	2	171	325	11	10	2	1	1.4	27	30	130
	6/22/2010	17		1	1	15	17	12	5	1	7	1.4	1	1	111
E5	PROMEDIO	**169**	**1095**	**69**	**4**	**97**	**169**	**8**	**6**	**1**	**2**	**1.2**	**105**	**20**	**141**
	7/22/2010	118	732	89	3	25	118	7	5	1	2	1.1	71	16	153
	8/25/2010	192	609	39	8	145	192	5	4	1	1	1.0	67	40	211
	9/22/2010	207	1943	35	3	170	207	9	6	1	3	1.2	179	23	135
	10/7/2010	44		4	0	40	44	11	6	1	6	1.2	4	4	105
	5/11/2010	224		147	3	75	224	11	10	2	1	1.4	19	20	126
E6	PROMEDIO	**173**	**573**	**76**	**4**	**93**	**173**	**9**	**7**	**1**	**2**	**1.3**	**62**	**19**	**143**
	7/22/2010	137	1013	108	4	25	137	10	6	2	4	1.3	96	14	133
	8/25/2010	315	236	82	8	225	315	6	5	1	1	1.2	46	52	198
	9/22/2010	79	471	12	2	65	79	9	5	1	3	1.2	46	9	135
	10/7/2010	51		10	0	40	51	11	6	0	5	1.2	4	5	113
	5/11/2010	225		137	3	85	225	11	10	2	1	1.5	19	21	140
Total general		168	722	82	3	83	168	11	7	1	4	1.3	74	15	117

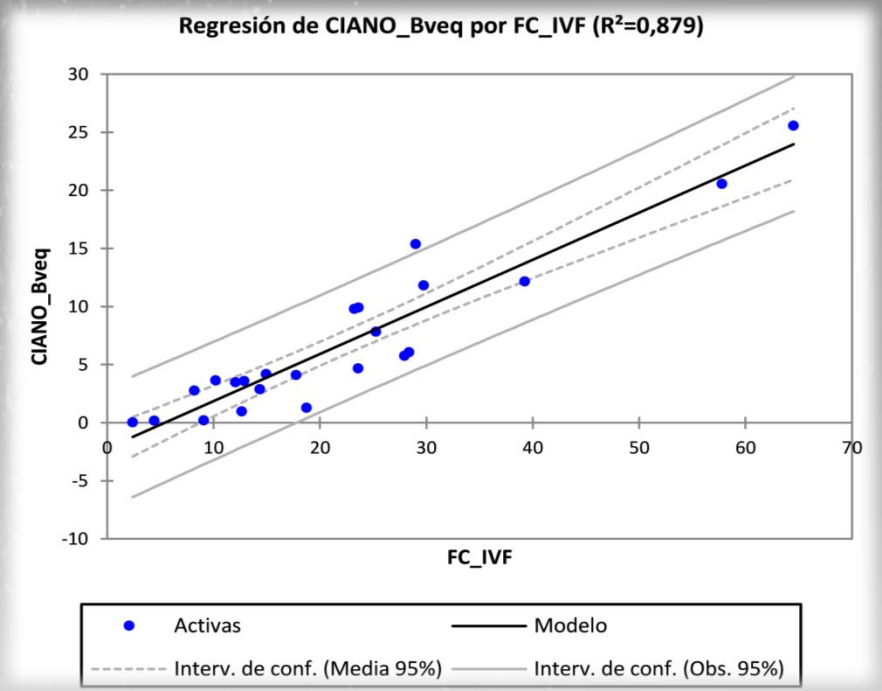
Ficocianinas a biovolumen de cianobacterias

26 muestras de taxonomía y biovolumen y mediciones simultáneas de ficocianinas.

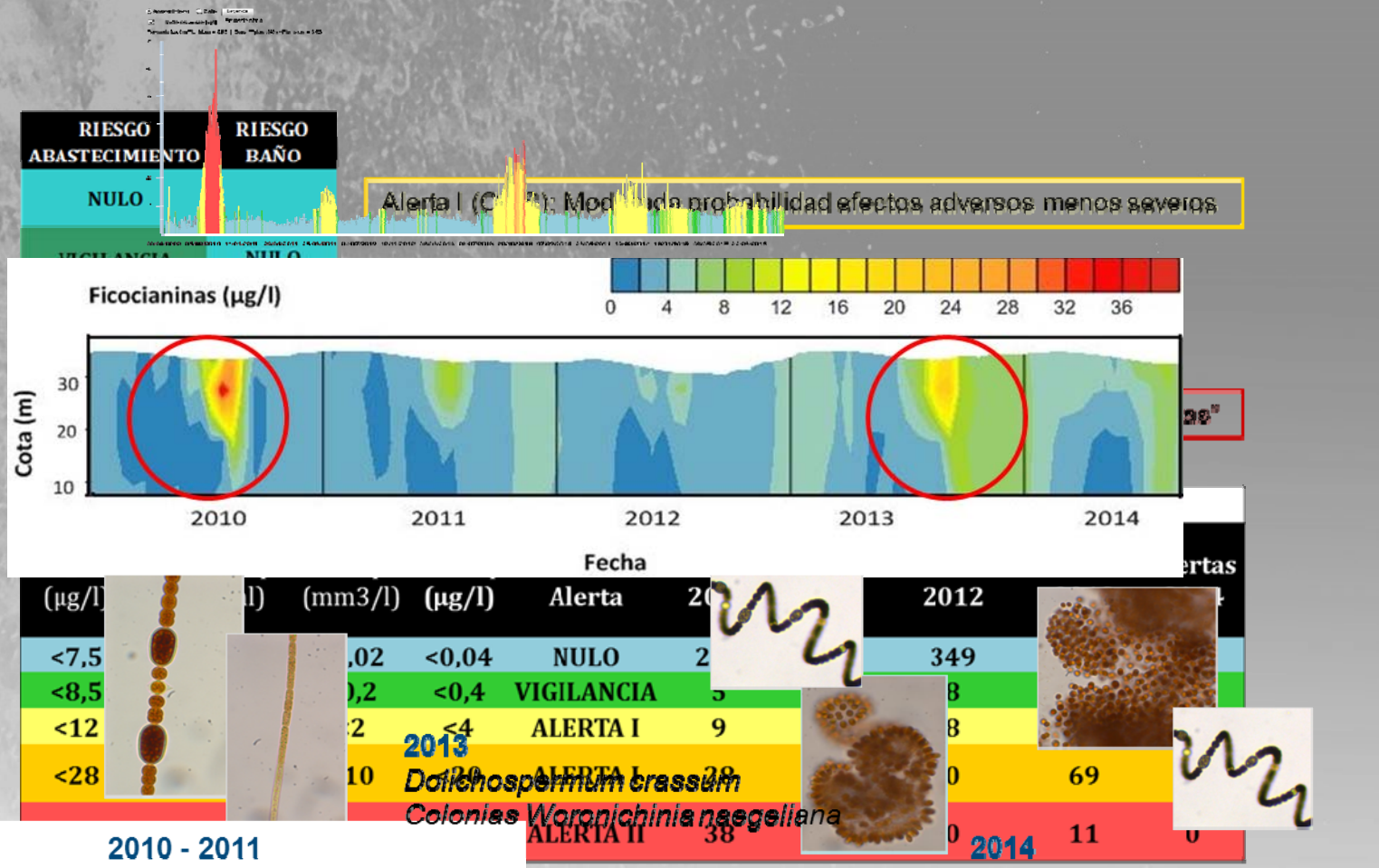
- Modelo de regresión lineal predecir biovolumen de cianobacterias a partir de registros *in vivo* de fluorescencia de ficocianinas (plataforma perfiladora y boyas).

*CIANO_Bveq = -2,179+0,406*FC_IVF*

- ANOVA relación significativa entre variables (P<0,0001 con estadístico F).



Sistema de alerta riesgo de cHAB



2010 - 2011
Dolichospermum planctonicum
Aphanizomenon flos-aquae

2013
Dolichospermum crassum
Colonias Woronichinia naegeliana

2014
Colonias Microcystis novacekii
Dolichospermum crassum

Desarrollo

- Resultados

  Ciberinfraestructura: Monitorización

  - Resumen de explotación
  - Destacados de plataformas

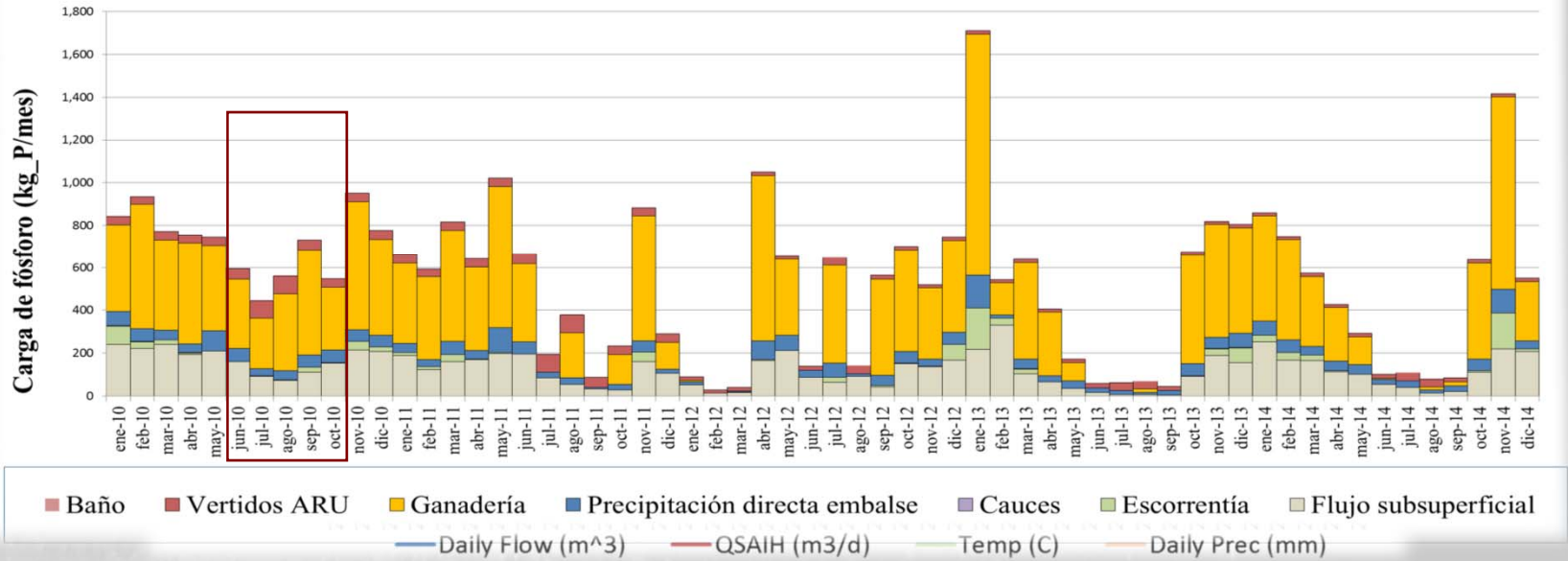
  Nutrientes y cianobacterias

  Modelado de la cuenca: Aportaciones de nutrientes

  Modelado del embalse

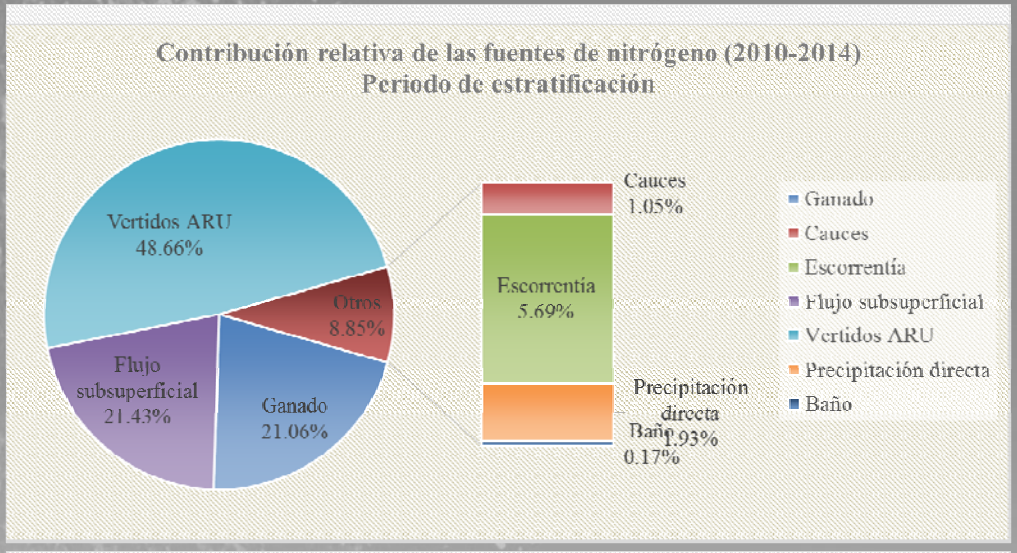
Aportaciones nutrientes

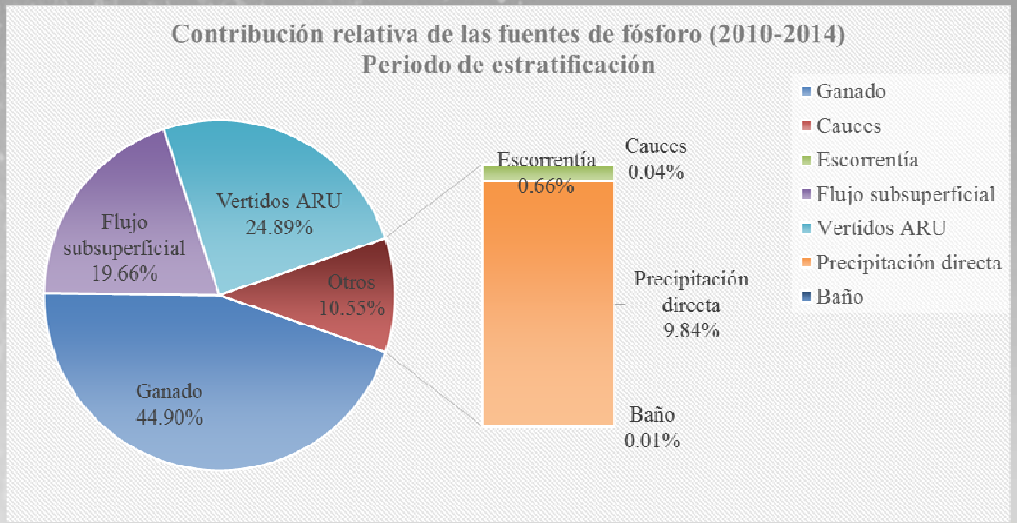
En invierno se producen las más altas, a veces en primavera, pero es más relevante para los cHABs lo que ocurre en verano, cuando el embalse baja de nivel y se concentra más la masa aportada.



Reparto por fuentes de aportación

En periodo de estratificación, la mayor aportación de N son los vertidos de ARU (50%).

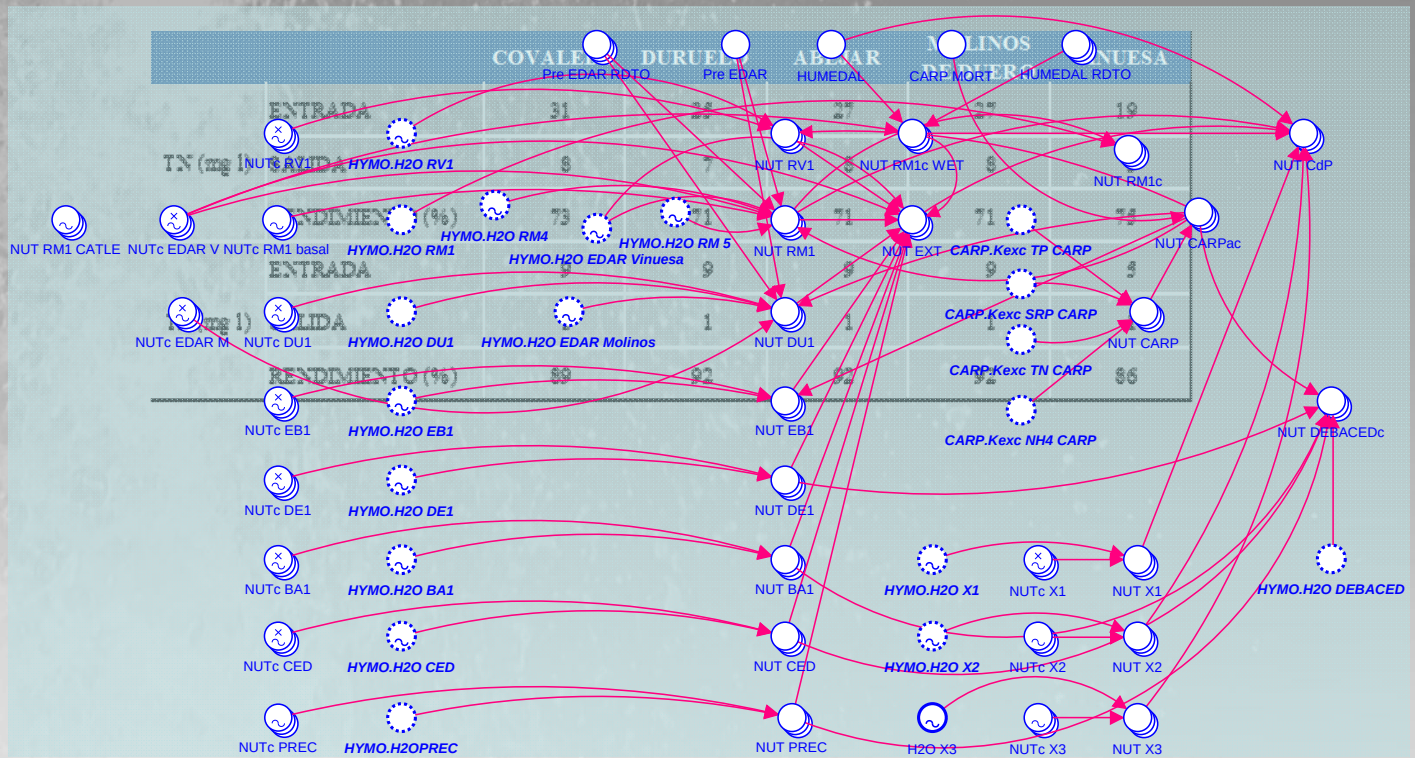




Escenarios de gestión (I)

Se centran en P, elemento típicamente limitante y sobre el que se puede actuar con mayor certidumbre (no fase atmosférica).

Se ha desarrollado una aplicación en lenguaje de sistemas dinámicos para calcular la carga según diferentes escenarios, con datos de contorno del año hidrológico 2014/15.

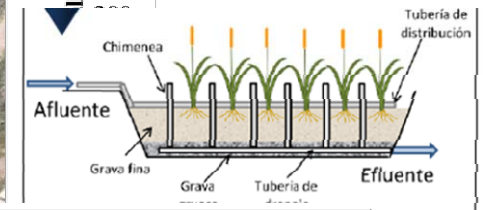


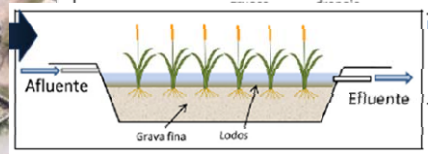
Escenarios de gestión (y II)

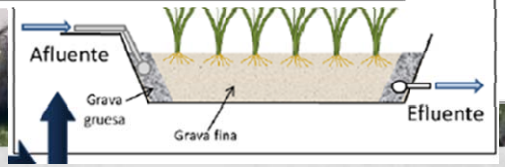
IV. Humedal controlado en entrada del río Remoncio: Retirada de 0,5 t/año de P y 1,6 de N con 24 ha de humedal. Rendimientos teóricos en prediseño (Serrano & Corzo, 2008).

Los humedales artificiales son sistemas de depuración en los que se reproducen los procesos de eliminación de contaminantes que tienen lugar en las zonas húmedas naturales.

Se clasifican en función del modelo de circulación del agua y de la disposición de la vegetación: De **flujo superficial (HAFS)** y de **flujo subsuperficial (HAFSs)** (horizontal y vertical).







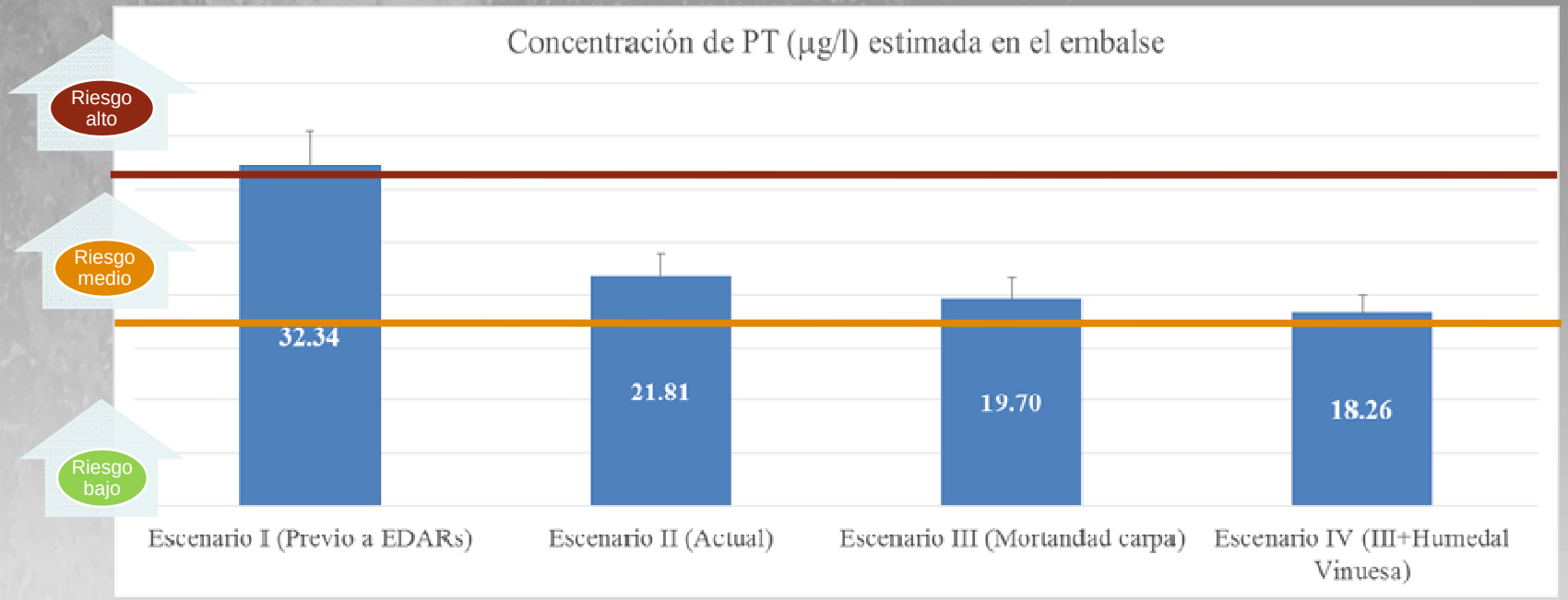
Los humedales constan de dos elementos principales:

- ✓ **Sustrato filtrante**: Sirve como soporte de la vegetación y permite la fijación de la población microbiana encargada de los procesos de eliminación de contaminantes.
- ✓ **Vegetación**: La vegetación proporciona superficie para la formación de biopelículas, facilita los procesos de filtración y adsorción de constituyentes del agua residual, contribuyen a la oxigenación del sustrato, favorecen la eliminación de nutrientes y controlan el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar.

Riesgo de cHAB esperado en el embalse

Modelo semiempírico de carga normalizada de fósforo (Vollenweider & Kerekes, 1980), estima concentración resultante en embalse a partir de carga externa y de TRH, supone estado estacionario. Riesgo de cHAB a partir de Carvalho et al. (2013).

$$[P]l=((L(P))/Qs)/(1+\sqrt{(z/Qs)})$$



Desarrollo

- Resultados

  Ciberinfraestructura: Monitorización

  - Resumen de explotación
  - Destacados de plataformas

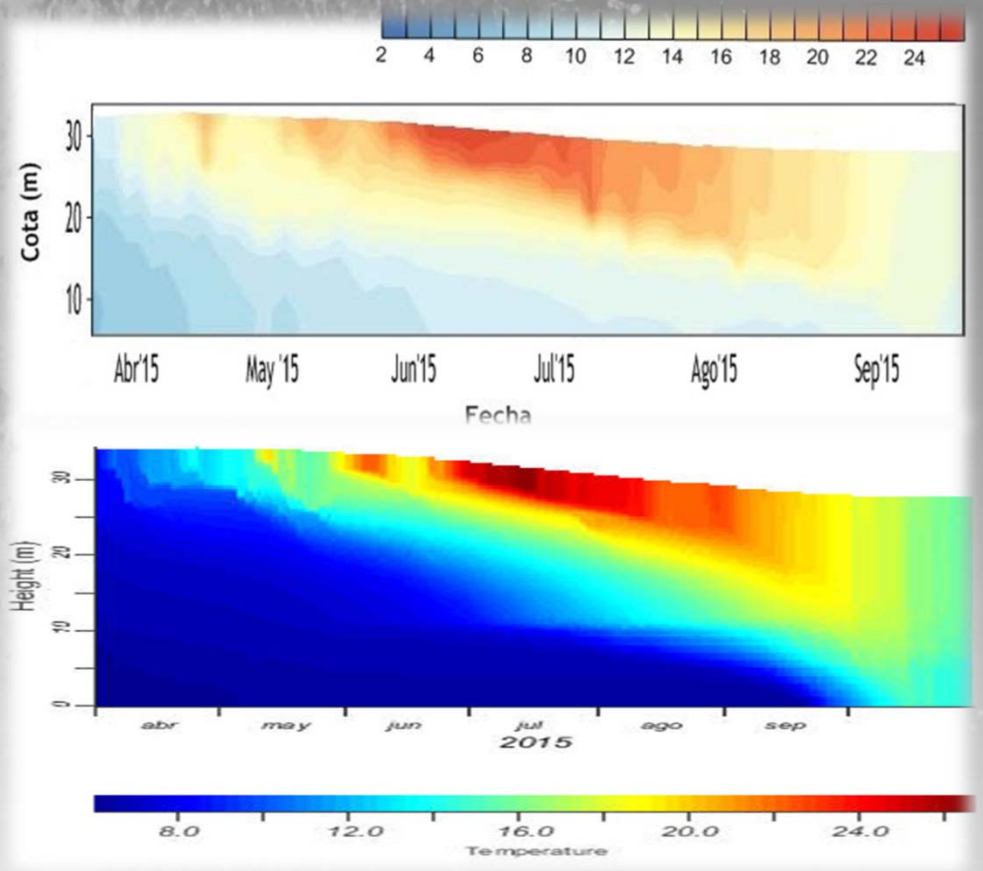
  Nutrientes y cianobacterias

  Modelado de la cuenca: Aportaciones de nutrientes

  Modelado del embalse

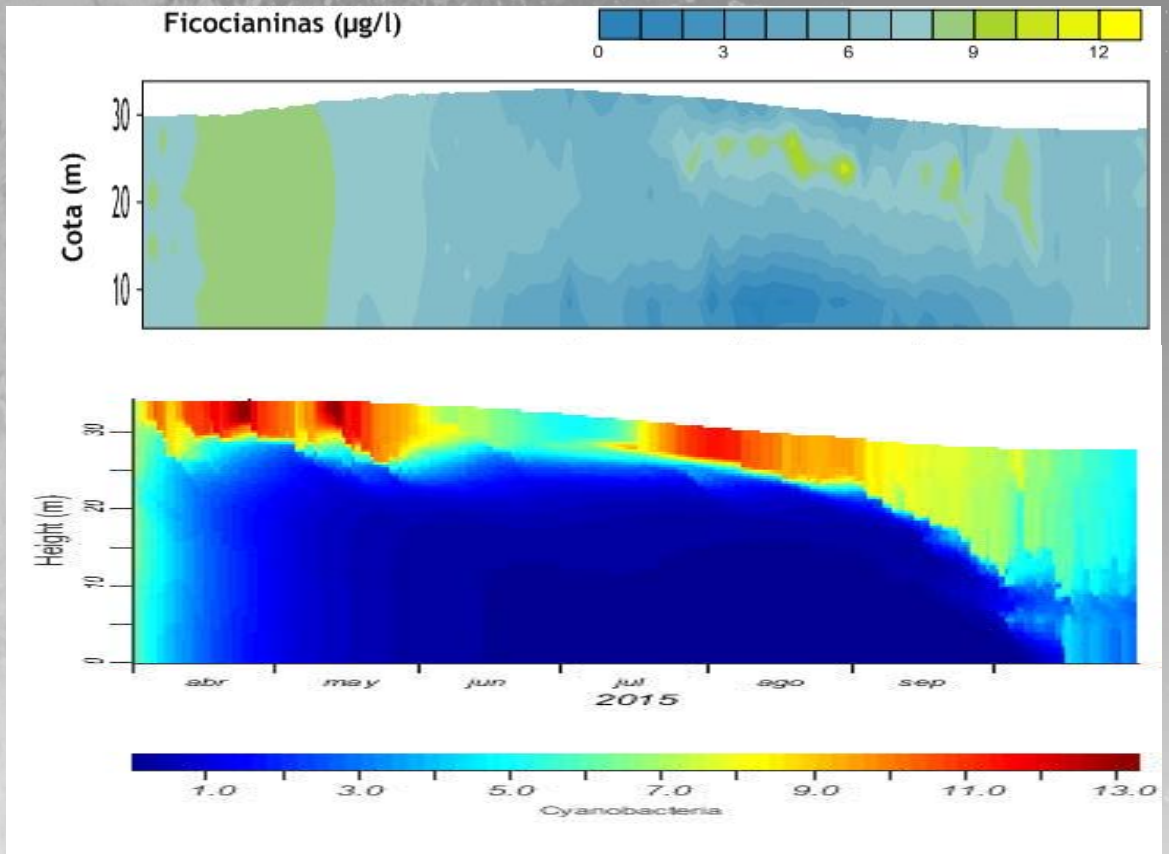
Modelo 1DV: Hidrodinámica

El modelo es capaz de reproducir adecuadamente el proceso de estratificación térmica y los rangos de temperatura del embalse.



Modelo CAEDYM: Cianobacterias

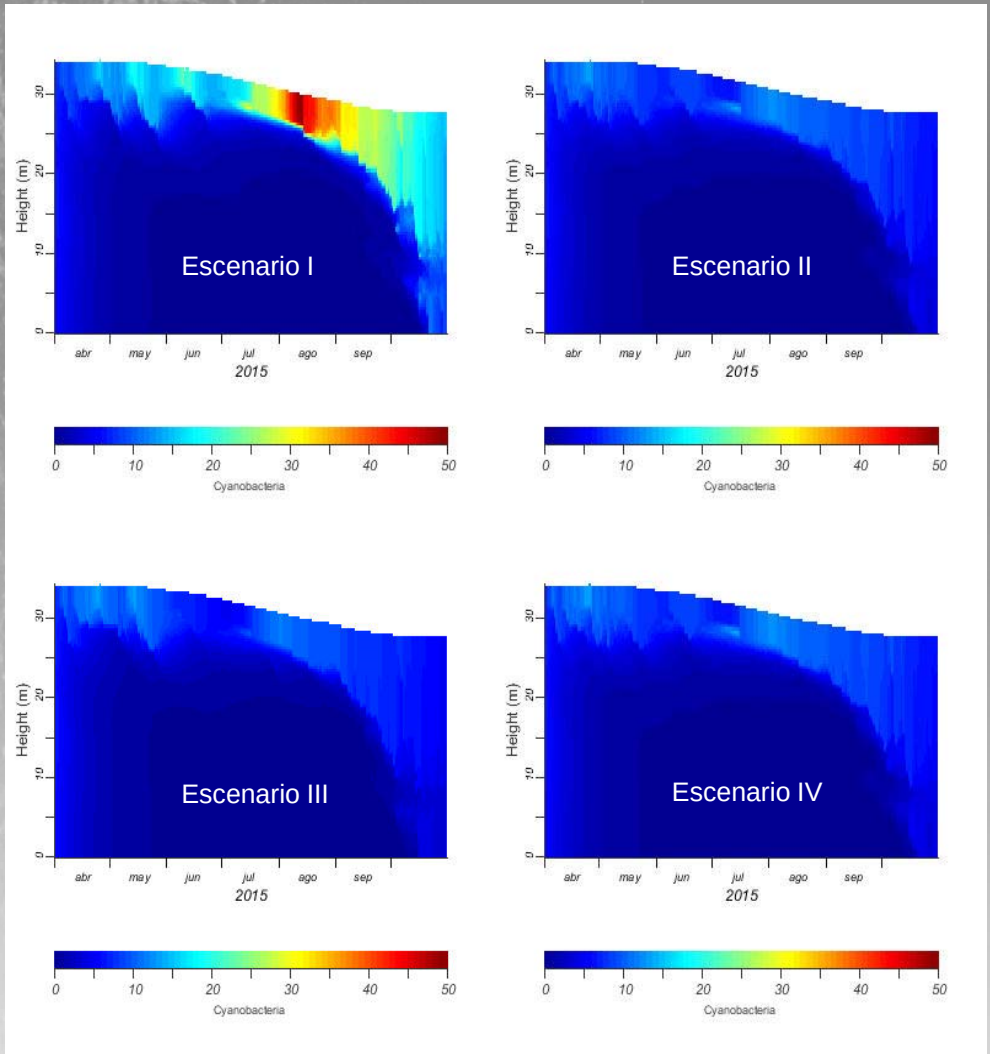
Se muestra útil para predecir riesgo de cHAB generalizado en el embalse



Aplicación de escenarios

El modelo reproduce la situación sin depuración, previa a la actual.

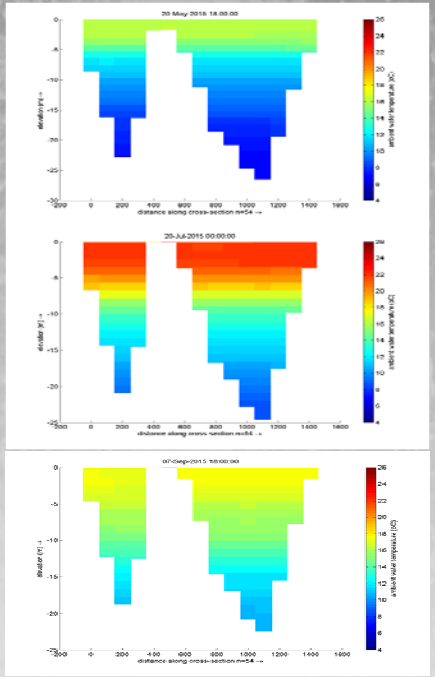
En los tratamientos adicionales (III y IV) los niveles de cianobacterias se mantienen parecidos.

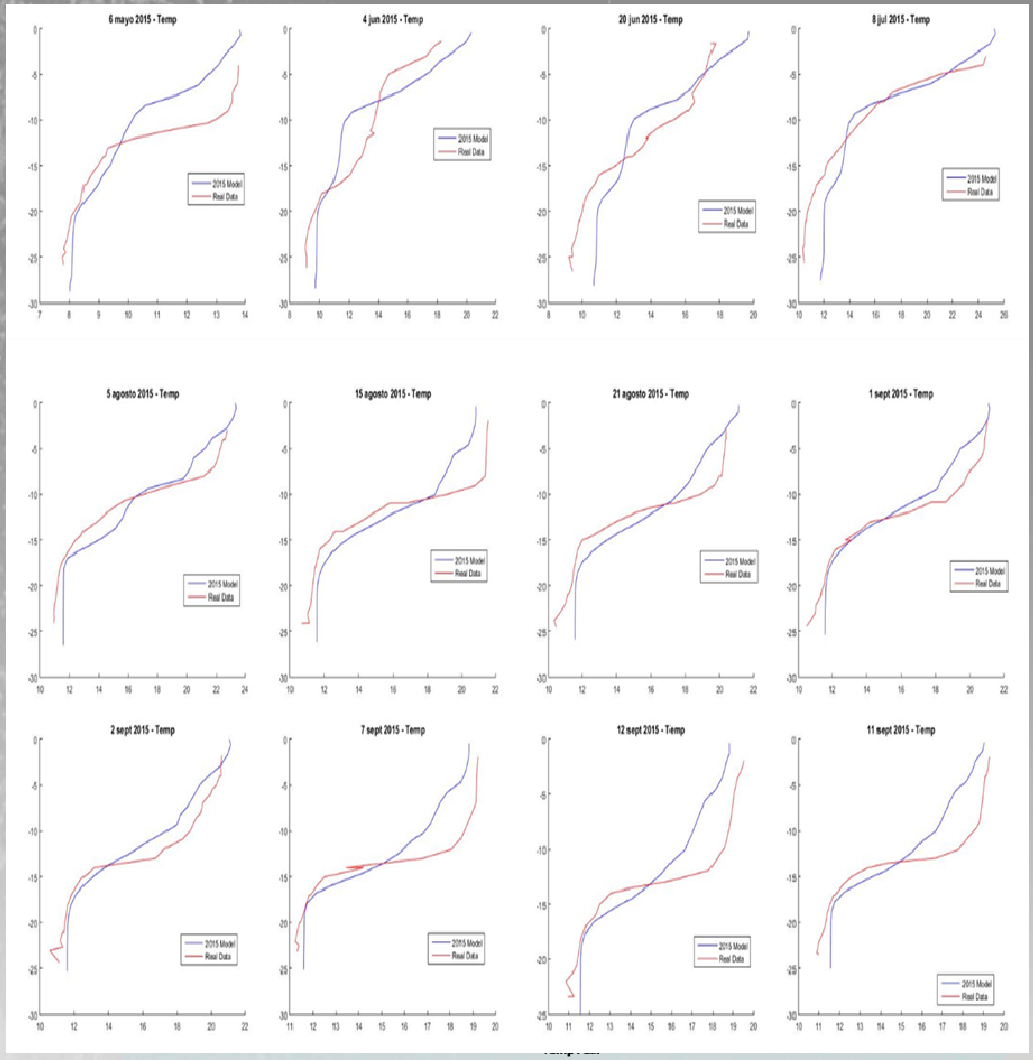


Modelo 3D: Hidrodinámica

Buen ajuste de la temperatura a lo largo del periodo de estratificación

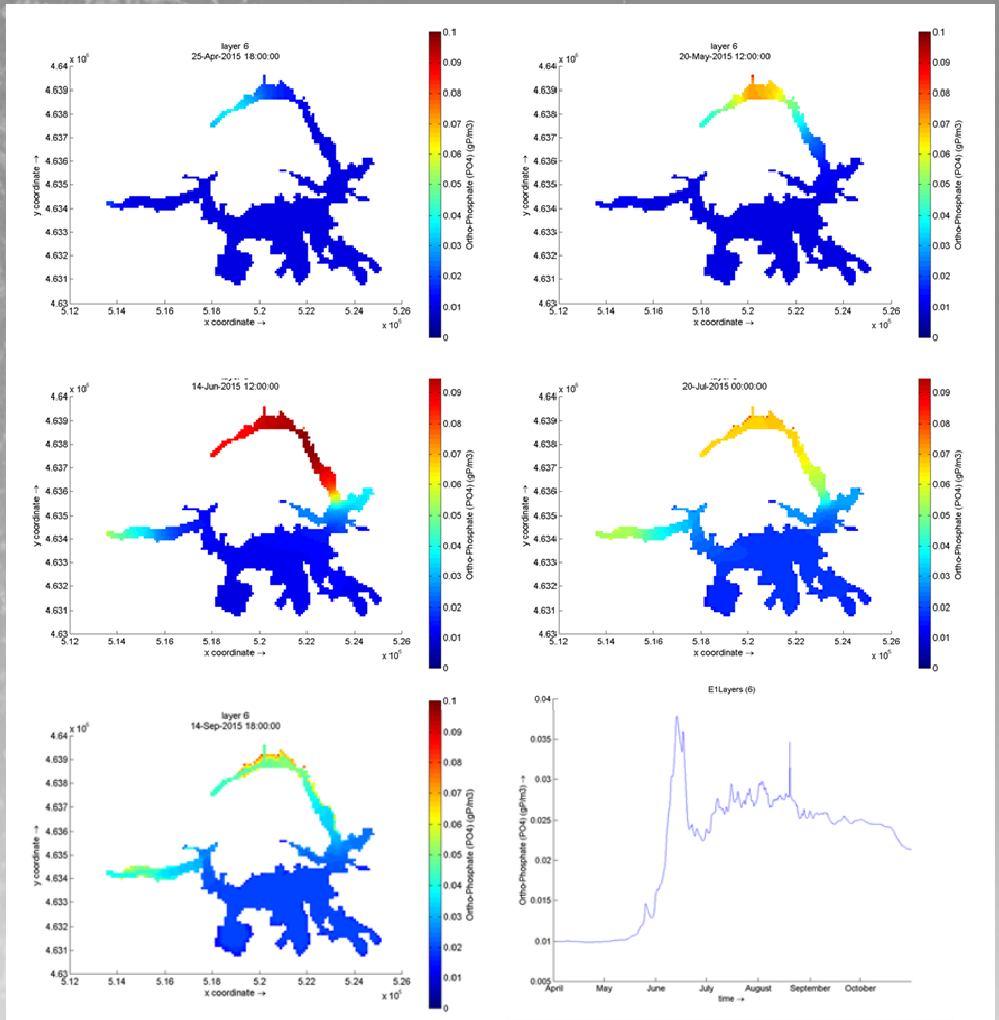
Estructura vertical correctamente simulada





Modelo 3D: Calidad del agua

- Traza bien el transporte y distribución de las sustancias.
- Los rangos de concentraciones de nitratos son adecuados pero sobreestima los de fósforo.
- No permite aún predecir cHABs de forma espacialmente distribuida (calibración futura con más datos en diferentes puntos de control).



Contenidos de la exposición

- Presentación
  - Introducción al problema ambiental
  - Presentación del proyecto
- Desarrollo
  - Métodos
  - Resultados
  - Discusión
- Conclusión

Desarrollo

- Discusión
  - Ciberinfraestructura remota
  - Nutrientes y cianobacterias
  - Modelado de la cuenca: Aportaciones de nutrientes
  - Modelado del embalse

Ciberinfraestructura remota

- Trascendencia de la calidad para optimización de gestión adaptativa (Campbell et al., 2013).
- Sugerencias:
  - Avanzar en técnicas de autocalibrado de sensores (Masson, 2015)
  - Sistemas de protección antifouling de sensores coste eficientes complementarios al cobre. Problemas partes móviles, componentes ópticos.
  - Parámetros clave esquivos para medición *in situ*. Fósforo: Quimiometría y microfluídica (Nightingale et al., 2015).

Desarrollo

- Discusión

  Ciberinfraestructura remota

  Aspectos limnológicos

  Detección y seguimiento de cHABs

  Repercusiones en gestión de cHAB y eutrofización

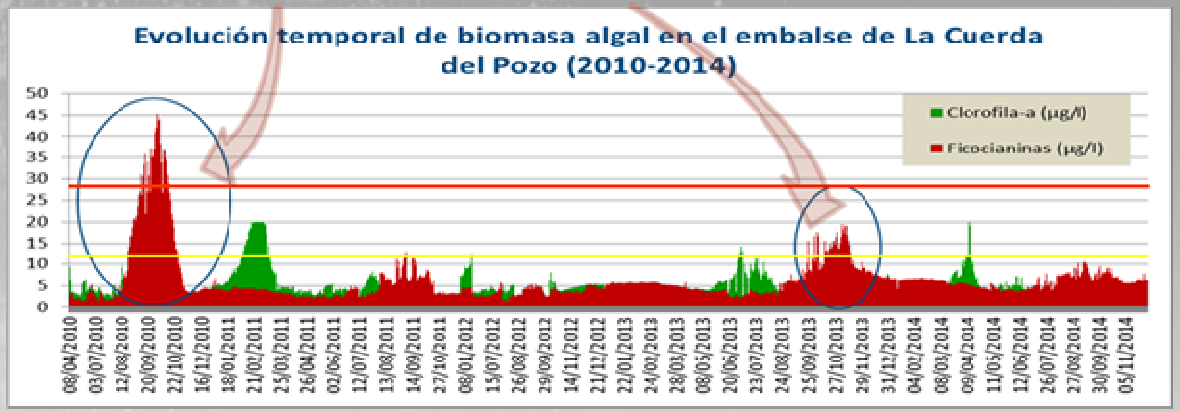
Aspectos limnológicos

- Nuevas técnicas analíticas para mejorar calibración de modelos de asignación de nutrientes a fuentes de exportación: Análisis de isótopos estables (Gooddy et al., 2016).
- Técnicas de análisis de nutrientes en rango bajo. No sirven las estándar de programas oficiales de calidad de aguas.
- Bajas concentraciones de nitratos favorecen dominancia de cianobacterias nostocales en verano y otoño temprano.
- Niveles de fósforo muy bajos (??). Mecanismos sugieren revisión de concepto clásico desconexión hipolimnion-algas cuando TRH<1 año:
  - Recarga interna desde sedimentos
  - Bombeo biológico: Cianobacterias Cottingham (2015) y peces
  - Inestabilidades hidrodinámicas en metalimion (Preusse et al., 2010)

Detección y seguimiento de cHABs

- Controles oficiales no detectaron los cHABs en Cuerda del Pozo

AÑO	DMA: dos muestreos en verano (2 a 4 datos/año)			ROEM+: mediciones en continuo (8.400 datos/año)		
	cyanoHAB	BV cianobacterias: promedio periodo estratificación	BV cianobacterias: máximo anual	cyanoHAB	BV cianobacterias: promedio periodo estratificación	BV cianobacterias: máximo anual
[illegible]	-	[illegible]	5.7	+	[illegible]	28.7
[illegible]	-	[illegible]	[illegible]	-	[illegible]	4.7
[illegible]	-	[illegible]	[illegible]	-	[illegible]	[illegible]
[illegible]	-	[illegible]	0.3	+	[illegible]	17.0
[illegible]	-	[illegible]	1.3	[illegible]	[illegible]	[illegible]



Medidas correctoras

- Descenso drástico de la magnitud y riesgo de cHAB con sistemas de depuración. Pero hay variaciones interanuales por factores hidrometeorológicos.
- Bajar más la concentración de nutrientes es proporcionalmente más costoso.
- Resulta más práctico abandonar objetivos cuantitativos y enfocarse en los riesgos de sucesos extraordinarios: Averías, crecidas y cortocircuitos.
- Medidas para combatir la fragilidad del ecosistema del embalse: Dilución previa con fusión de cauces, humedales controlados y biomanipulación (añadir procesos de regulación "*Top-down*" a los sistemas de simulación dinámica del ecosistema, ejercidos por peces y zooplancton).

Contenidos de la exposición

- Presentación
  - Introducción al problema ambiental
  - Presentación del proyecto
- Desarrollo
  - Métodos
  - Resultados
  - Discusión
- Conclusión

Conclusiones

- Se ha diseñado, desplegado, puesto en explotación y mantenido una ciberinfraestructura remota que ha servido para mejorar el conocimiento del funcionamiento del ecosistema y para plantear modelos de simulación.
- Esta CI proporciona además nuevas posibilidades futuras para investigar, conocer y gestionar la eutrofización y el riesgo de cHABs en el embalse de La Cuerda del Pozo (Soria).
- El sistema de monitorización y alerta desarrollado ha trazado eficientemente la evolución de la biomasa de cianobacterias a lo largo del tiempo, y también los periodos, magnitud y ritmo de los cHABs.
- Se ha demostrado que los protocolos estándar en materia de seguimiento y control del estado ecológico de las masas de agua, de carácter más general y en cumplimiento de la DMA, no permiten detectar y diagnosticar adecuadamente los cHABs en este tipo de casos.

Conclusiones (II)

- El programa de Saneamiento y Depuración del Alto Duero ha reducido significativamente el riesgo de cHABs en el embalse, pero se sigue padeciendo un riesgo asociado a eventos extraordinarios relacionados con la variabilidad hidro-meteorológica.
- Los sistemas determinísticos de simulación dinámica son adecuados para poner la avalancha de datos generados al servicio de la comprensión del funcionamiento de los procesos relevantes y para evaluar alternativas de gestión. Pero se requieren nuevos módulos de simulación de los procesos relacionados con niveles superiores de la red trófica (peces y zooplancton) y mecanismos de migración vertical de las cianobacterias. Para predecir eventos a corto plazo sería muy interesante ensayar modelos heurísticos, como las redes neuronales artificiales.
- Se ha constatado que existe una necesidad real de avanzar hacia nuevas formas de gestión de este problema, que presenta alta complejidad y una posible tendencia negativa relacionada con el cambio climático. En este sentido, la aproximación adoptada es una línea de trabajo prometedora, y ya se empieza a reconocer así en la comunidad científica e incluso en la de la gestión del agua. Esto confiere un carácter innovador y demostrativo al proyecto.

Conclusiones (y III)

- Se propone poner esta ciberinfraestructura y los avances en materia de simulación al servicio de la comunidad científica, para avanzar hacia nuevas formas de gestión de la eutrofización de los embalses, que traten de forma holística el ecosistema.
- Se recomienda adoptar una estrategia basada en este tipo de herramientas, con el fin de optimizar las actuaciones correctoras y tomar decisiones en función de resultados y contextos de contorno vigentes. Esto supondría progresar hacia una gestión adaptativa, que robustecería el ecosistema frente a tensiones externas no controlables.
- La aproximación adoptada se podría poner al servicio de numerosos casos similares, en embalses y otros tipos de masas de agua.

El equipo

RESERVA

Exportación de nutrientes

Aportación de fracción sólida (erosión y sedimento)

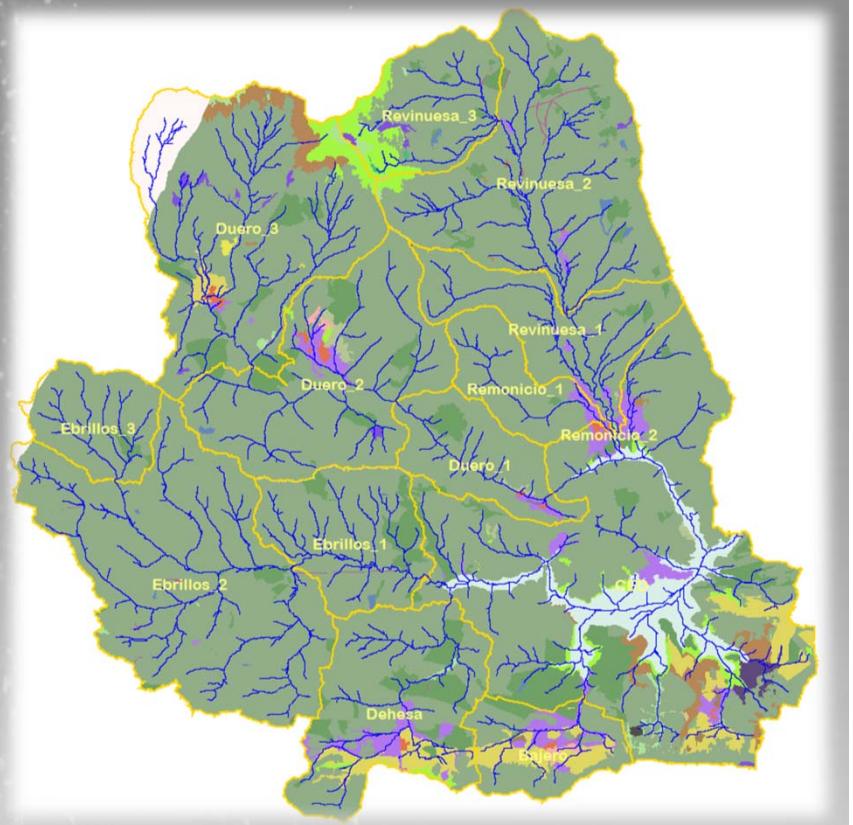
Producto de la carga de sedimentos (USLE) y de la concentración media de nutrientes en los sedimentos.

Escorrentía urbana

Fracción sólida, función exponencial de acumulación y lavado por lluvia.

Fracción disuelta aguas escorrentía

Concentraciones características de fósforo según usos del suelo.

Precipitación directa al embalse

Concentración de fósforo en deposición mensual.