



Sistema de teledetección de alta resolución espacio-temporal para gestión integral de cuenca hidrográfica

Autor: Raquel Luengo De Marcos

Institución: Fundación Instituto Tecnológico de Galicia

Otros autores: Analía López Fidalgo (ITG); Agustín P. Monteoliva Herreras (Ecohydros); Àlex Monná (Ecohydros); Juan Luis Castromán Porto (ITG); Marco A. González Fernández (ITG)

1. Resumen

Alrededor del 33% de los sistemas de control de los ríos y lagos europeos registran síntomas de eutrofización, al igual que ocurre en algunas aguas costeras. La importancia de la eutrofización como consecuencia de la contaminación de las aguas es tal que se aborda en múltiples directivas europeas: la “Directiva sobre nitratos”, la “Directiva sobre la pesca de agua dulce”, la “Directiva sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas”.

Los procesos que intervienen en la eutrofización son numerosos, complejos y dinámicos por lo que para su control se requiere disponer de herramientas que permitan una gestión integral de la cuenca hidrográfica posibilitando evaluar en términos de estado ecológico los efectos conjuntos de los diferentes procesos naturales y de presión, como el cambio climático, usos del territorio, gestión agropecuaria y forestal.

La novedad de la solución de monitorización que se presenta es que permite adquirir información relativa de los diferentes parámetros pertinentes en el seguimiento ambiental de forma intensiva (alta resolución temporal y espacial), en tiempo real y con alta cobertura (ámbito de cuenca), permitiendo así detectar los procesos y flujos de nutrientes en la unidad de gestión del agua por excelencia, es decir la cuenca hidrográfica. Esto es muy trascendente porque se están evaluando procesos (proliferación de algas tóxicas), en los que están presentes numerosos factores que se producen y cambian en intervalos de tiempo pequeños, pudiendo ser relevantes incluso pasos de tiempo subdiarios.

Aplicar ese conocimiento a un escenario concreto, como la cuenca del embalse de la Cuerda del Pozo, que reúne en un espacio contenido los diferentes elementos de esta problemática ambiental tan extendida, tiene en consecuencia un valor innovador y demostrativo inigualable.

Se presenta el diseño del demostrador del sistema de monitorización remota de cuenca a escala completa. Se detalla la arquitectura y la topología de los diferentes tipos de estaciones a instalar (estaciones de nivel, estaciones completas de río, estaciones de cianobacterias, estaciones meteorológicas), el análisis de las zonas piloto y la arquitectura del sistema en general.

El presente desarrollo se enmarca dentro del proyecto ROEM+, preludiado en CONAMA 2012: ISBN 978-84-695-6377-9, artículo “Gestión Avanzada de la Eutrofización de Aguas Superficiales a escala integral de Cuenca Hidrográfica”.

Palabras clave: alta resolución, cuenca hidrográfica, DMA, eutrofización, gestión integral, monitorización multi-paramétrica, teledetección.

2. Introducción

La eutrofización es un proceso complejo que se produce tanto en las aguas dulces como en las marinas, donde el desarrollo excesivo de ciertos tipos de algas perturba los ecosistemas acuáticos y se convierte en una amenaza para la salud animal y humana. La causa principal de la eutrofización es una excesiva concentración de nutrientes.

La eutrofización es un problema importante y complejo que afecta al 50% de los recursos hídricos europeos. Alrededor del 33% de los sistemas de control de los ríos y lagos europeos reporta de signos eutrofización, al igual que ocurre en algunas aguas costeras. Mientras que el 44% de los lagos europeos no alcanzan el objetivo de buen estado ecológico o buen estado ecológico potencial que establece la Directiva Marco del Agua (DMA)[1][2][3]. Las principales causas son las emisiones de fuentes difusas y puntuales procedentes de la contaminación agrícola, a partir de las aguas residuales urbanas y las emisiones industriales, haciendo que los nutrientes y enriquecimiento orgánico, alteren los hábitats.

La Unión europea se ha comprometido a conseguir un buen estado para las aguas. Además, ha puesto sobre la mesa los medios para conseguirlo, con compromisos legalmente vinculantes. En el caso de gestión del agua, la UE ha desarrollado un enfoque integrado introducido en la Directiva Marco del Agua (DMA) y otras políticas del agua (Directiva 91/271/CEE y la Directiva 91/676/CEE).

Las Directiva 91/271/CEE y la Directiva 91/676/CEE deben ser integradas en el proceso de planificación de cuencas hidrográficas. Establecen la designación de zonas sensibles como resultado de la acción en materia de gestión del agua independiente del origen de la contaminación (es decir, si la contaminación proviene de vertidos de aguas residuales urbanas o procede de fuentes basadas en la agricultura, ya que ambos contribuyen como fuentes de exceso de nutrientes al problema de la eutrofización) [5] [6].

A pesar de la importancia dada a la reducción de la contaminación en la legislación ambiental reciente, las concentraciones de contaminantes en muchas aguas europeas se han mantenido altos - una gran proporción de las masas de agua europeas se ven afectadas por las presiones de contaminantes de origen difuso [7]. Las evaluaciones realizadas y reportadas a la UE por los estados miembro sobre el estado de las masas de agua y las presiones revelaron que muchos organismos europeos de aguas superficiales en la actualidad no logran el objetivo de buen estado ecológico y corren el riesgo de no alcanzarlo en 2015 como establece la Directiva Marco del Agua debido a problemas en la gestión de los aportes de nitrógeno y otra contaminación orgánica del agua [8].

Es necesario por tanto un mayor seguimiento de la calidad de las masas de agua y sus principales presiones. Controlar la aparición y desarrollo de floraciones de cianobacterias, en gran medida debido a su capacidad para proliferar y a producir toxinas peligrosas para la salud humana y animal.

Cabe destacar además que el estado químico de muchas de las aguas superficiales de Europa sigue siendo desconocida (39% de los ríos). Además, la comprensión de la relación entre la presión y el estado químico sigue siendo incompleta [7][10].

En este contexto, se desarrolla el proyecto ROEM+ cuyo principal objetivo de demostrar la viabilidad y eficiencia de un enfoque innovador de gestión integral de la cuenca que permita abordar con una metodología de alta resolución el extendido y creciente problema de la eutrofización de las masas de agua con toxicidad asociada en aguas de baño y abastecimiento, y conseguir el buen estado ecológico del agua (objetivo medioambiental de la DMA).

En las siguientes secciones se describe el sistema de gestión integral de cuenca implementado en el proyecto ROEM+, el cual permite disponer de una gran cantidad de información en tiempo real y de manera distribuida, ampliándose el alcance de los sistemas tradicionales de monitorización (basados en puntos o estaciones de muestreo automático limitados en número y ubicación por las tecnologías empleadas, tipo SAIH y SAICA) hacia sistemas de monitorización avanzados con estaciones de control distribuidas a lo largo de la cuenca.

En la sección 3 se facilita una descripción del área de estudio y aplicación del proyecto ROEM+ que se divide en los siguientes apartados: marco físico, características morfométricas e hidrológicas, actividades humanas y usos del suelo y estaciones de control. Finalmente se incluye el mapa del área de estudio. La sección 4 recoge el diseño de la red de sensores y comunicaciones (cuenca, ríos, humedal controlado, embalse). Finalmente en el apartado 5 se presentan los principales resultados.

3. Área de demostración y aplicación

El escenario geográfico sobre el que se ha llevado a cabo la implementación y proyecto de demostración ROEM+ es toda la cuenca de drenaje del embalse de “Cuerda del Pozo” que está en la provincia de Soria e incluye 3 subcuencas principales (Revinuesa, Duero y Ebrillos), 1 subcuenca secundaria (Remonicio) y el propio embalse.

La cuenca del embalse de Cuerda del Pozo tiene una extensión moderada pero resulta muy representativa de los territorios rurales mediterráneos y además se encuentra en la cabecera de uno de los ríos más importantes de la Península Ibérica. Su problemática es también representativa de numerosas masas de agua europeas. En los últimos estudios realizados sobre calidad de aguas del embalse de Cuerda del Pozo, promovidos por la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD), se estableció un diagnóstico de eutrofia y la necesidad de impulsar acciones correctoras para revertir esa tendencia y evitar sus consecuencias menos deseables, como las proliferaciones de algas cianofíceas, que posteriormente se han identificado como posibles productoras de toxinas. Consecuentemente, dada la importancia de esta cuenca y su situación estratégica en la cabecera de la cuenca hidrográfica del Duero, se ha seleccionada como área de estudio y demostración del proyecto ROEM+.

En los siguientes subapartados se realiza una descripción del área de estudio junto con un mapa detallado de la cuenca del embalse de Cuerda del Pozo.

3.1. Marco Físico

El ámbito geográfico del proyecto LIFE ROEM+ se corresponde con el embalse de La Cuerda del Pozo (Soria), así como de su cuenca de drenaje (Ver Figura 1).

El embalse se emplaza en el cauce del río Duero y recibe sus aguas, y las de los ríos Revinuesa por la margen izquierda y Ebrillos por la derecha, ambos en la zona posterior de la masa de agua, así como de pequeños arroyos temporales.

La cuenca del embalse se emplaza en el Alto Duero y en ese recorrido el río Duero discurre casi torrencialmente con un desnivel de unos 1000 m en unos 40 km de recorrido, desde una cota superior a los 2000 en las fuentes, hasta la cota 1085 que corresponde a la máxima del embalse.

Los límites septentrionales de su cuenca hidrográfica coinciden con las estribaciones de los Picos de Urbión y Cebollera más al este, en el Sistema Ibérico. En estas sierras se sobrepasan los 2000 m de altitud y la acción glaciaria ha dejado su impronta en una serie de lagunas -Urbión, Larga, Helada y Negra, en el nacedero del Duero-. Los tributarios principales (Duero y Revinuesa) discurren por una zona de alta montaña, mientras que la cuenca de escorrentía directa y el río Ebrillos se emplazan en una franja de montaña media de relieve más suave. La cuenca está constituida en su totalidad por materiales del mesozoico o secundario, dominados por rocas sedimentarias: calizas, margas, areniscas, dolomías y arcillas.

El tipo de clima predominante es el mediterráneo frío, pero esta zona tiene fuertes influencias continentales por la protección de los cinturones montañosos. No obstante, el gradiente interno en la cuenca es muy amplio debido a que el río discurre al pie de las formaciones montañosas.

La pluviosidad media de la zona es de 826mm y la cuenca se sitúa entre las isoyetas medias de 700mm/año, en la margen derecha, a los 1000mm en la margen izquierda. La precipitación se reparte homogéneamente a lo largo del año, con un máximo primaveral poco pronunciado y un mínimo estival no muy acusado.

La evapotranspiración potencial es de 600-700mm y el régimen de humedad es el Mediterráneo fresco (el agua disponible cubre completamente la evapotranspiración potencial).

3.2. Características morfométricas e hidrológicas

La cuenca vertiente al embalse de Cuerda del Pozo tiene una superficie total de 550km². La cuenca total se ha dividido inicialmente en cinco subcuencas (ver Figura 1): una correspondiente al río Duero -13.280ha-, otra al Revinuesa -11.610ha-, otra al Remonico 1409ha-, otra al Ebrillos -11.230ha-, y una quinta que sirve para delimitar la zona de escorrentía directa (CED) -16.808ha-, la mayor de todas. Estas subcuencas principales serán objeto de mayor desagregación en función de la definición de unidades de gestión y simulación.

El embalse tiene una gran extensión-2176 ha en su máximo nivel normal, con una longitud máxima de 12Km y una profundidad media moderada -10m-, mientras que la profundidad máxima es de 36m. La capacidad máxima original del embalse es de 229,2hm³. Se trata por tanto de un embalse de medianas dimensiones pero con un gran desarrollo en superficie y una compleja morfología que permite la formación de varias masas de agua bien diferenciadas y amplias zonas de somera profundidad. Además el embalse abastece de agua potable a la ciudad de Soria y parcialmente a la de Valladolid; sirve para regar 26.000 hectáreas hasta su confluencia con el Río Pisuegra. Existe también una planta de producción de energía hidroeléctrica propiedad de Iberdrola con una potencia instalada de 6.080 kW y una energía anual media producible de 8,5 GWh.

Por su situación geográfica se trata de un embalse potencialmente monomítico¹, típico de zonas templadas. El periodo de estratificación comienza en mayo y persiste hasta el mes de Octubre, aunque la masa de agua más abierta (brazo sur), desaparece antes. La profundidad media del comienzo de la termoclina, es decir el grosor del epilimnion, es de 10m. La relación entre éste y el espesor de la zona fótica es de 1,7, lo que descarta una limitación espacial superpuesta a la que impone la extinción de la luz en la columna de agua.

Dentro de la cuenca se pueden identificar 9 masas de agua superficial de tipo río (ver Figura 1) pertenecientes a tres tipologías diferentes (11: ríos de montaña mediterránea silíceo; 12: ríos de montaña mediterránea calcárea; 27: ríos de alta montaña), ver Tabla 1. Además también está definida como masa de agua superficial de tipo lago o embalse el propio embalse de Cuerda del Pozo. Aunque oficialmente en el contexto de la Directiva Marco del Agua la Laguna Negra no constituye una masa de agua, en este proyecto se ha diferenciado como lago.

La explotación del embalse durante la época estival se produce desde el hipolimnion, lo que favorece el crecimiento de las poblaciones fitoplanctónicas además de reducir la capacidad global del sistema para asimilar la materia orgánica que llega desde niveles superiores. Asimismo, la estrategia de explotación del embalse es típica de los sistemas de regadío en los que se produce un descenso acusado y continuado entre los meses de Mayo y Octubre para después recuperarse durante los meses de periodo de mezcla – Octubre a Marzo-.

MASA DE AGUA	ECOTIPO	KM
Río Revinuesa desde cabecera hasta localidad de Vinuesa, y afluentes	Ríos alta montaña	18,05
Río Revinuesa y arroyo Remonico hasta embalse de Cuerda del Pozo	Ríos de montaña mediterránea silíceo	4,05
Río Duero desde cabecera hasta la confluencia con río Triguera, y río Triguera	Ríos alta montaña	8,26
Arroyo la Paúl desde cabecera hasta confluencia con río Duero	Río alta montaña	6,54

¹ Significa que presenta un único ciclo anual de mezcla-estratificación vertical.

Río Duero desde confluencia con el río Triguera hasta aguas abajo de la confluencia con río de la Ojeda	Ríos alta montaña	11,11
Río Duero desde aguas abajo de Covalada hasta embalse de Cuerda del Pozo	Ríos de montaña mediterránea silíceo	7,79
Río Duero desde la presa del embalse de Cuerda del Pozo hasta el embalse de Campillo de Buitrago, y arroyo Rozarza	Ríos de montaña mediterránea silíceo	8,96
Río Ebrillos desde cabecera hasta el embalse de Cuerda del Pozo, y río Vadillo y arroyo de Mataverde	Ríos de montaña mediterránea silíceo	21,09
Arroyo de la Dehesa desde cabecera hasta el embalse de Cuerda del Pozo	Ríos de montaña mediterránea calcárea	7,93

Tabla 1. Masas de agua superficial tipo río en la cuenca vertiente del embalse de Cuerda del Pozo

3.3. Actividades humanas y usos del suelo

La cuenca del embalse de Cuerda del Pozo es una zona de alta y media montaña con una densidad de población muy baja –9,5 hab/km² es el valor medio para la provincia de Soria-. Asimismo, las principales poblaciones dentro de la cuenca son: Duruelo de la Sierra, Covalada, Salduero, Molinos de Duero, Vinuesa y Abejar (ver Figura 1).

Actualmente existe una diversificación de actividades económicas generada por el turismo estacional, tanto regional como nacional, que acude a la zona atraído por una oferta de actividades en la naturaleza relacionadas con los Picos de Urbión y sus lagunas, la estación de esquí (“Punto de Nieve Santa Inés”), excursionismo, caza y pesca, recolección de setas y también con el baño y navegación en el mismo embalse. Existen 3 zonas de baño oficiales en el embalse que son: Playa Pita-55,98ha-, Peña Gamella de Herreras-65,39ha-, y Base Náutica el Bardo-5,93ha- (ver Figura 1). Sin embargo el sector primario es el que tradicionalmente ha ocupado a la población y siguen siendo relevantes la explotación maderera y ganadera. La ganadería ovina, antaño muy abundante puesto que la zona servía de agostadero en importantes rutas transhumantes, es ahora de carácter bovino.

La cubierta vegetal es boscosa de pinos (albar y negral) en las partes altas -cuencas de los tres tributarios-, con algunos pastos de alta montaña, y rebollar entre pastizales en las zonas más cercanas al embalse. Se encuentran también choperas en plantaciones regulares en los lugares donde el clímax edáfica es la aliseda. Existe una buena representación de las choperas junto al embalse, al sureste del núcleo urbano de Vinuesa.

En la zona de escorrentía directa al embalse los principales usos del suelo son los siguientes: regadío-representa el 0.3% de la superficie total-, cultivos herbáceos de secano- suponen un bajo porcentaje en la zona inmediata al embalse, prados naturales-el rendimiento en materia seca suele ser de alrededor de 2000Kg/ha-, pastizales-en los términos que rodean al embalse se han censado 5526ha-, matorrales-zonas en las que el

arbolado no alcanza el 20% de cabida cubierta- y superficie arbolada-es el aprovechamiento de mayor importancia, 53.2%.

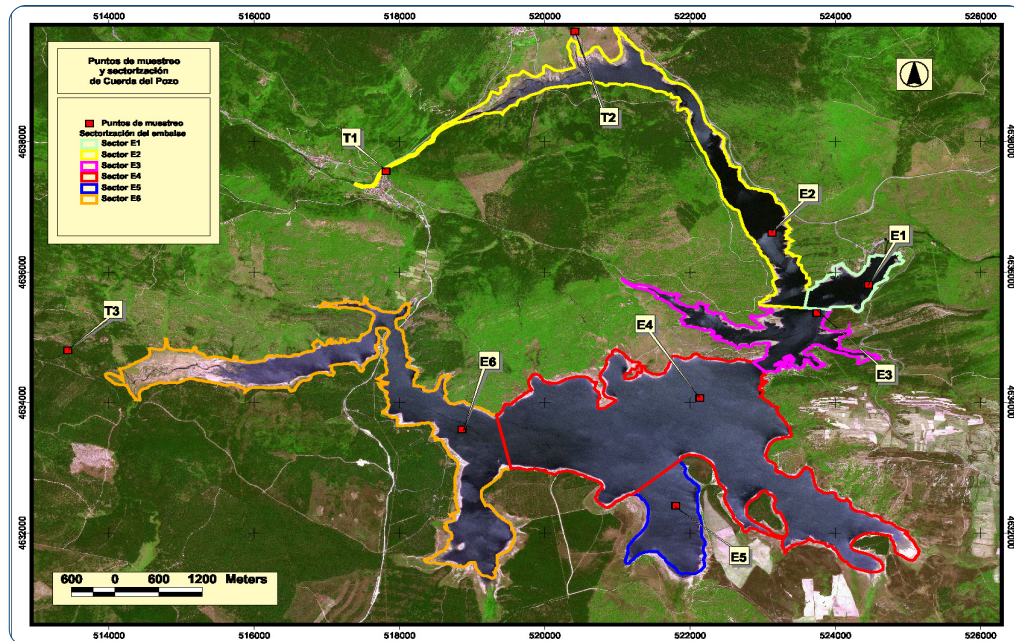


Figura 1. Sectorización del embalse de Cuerda del Pozo y situación de los puntos de muestreo en estudios de eutrofización previos

3.4. Estaciones de control previas existentes

Existen diversas estaciones de control (estaciones de aforo de CHD, estaciones meteorológicas de AEMET, redes de control de CHD) dentro de la cuenca de estudio, cuya información se ha integrado en la plataforma web GIS de gestión/control del proyecto ROEM+ y se utilizará de manera adicional a la información generada por las propias estaciones diseñadas en el ROEM+ para alimentar los modelos de simulación a implementar.

4. Diseño del sistema de monitorización remota de cuenca a escala completa.

4.1. Red de monitorización integral de cuenca

Para hacer frente a la problemática de la eutrofización mediante una gestión eficiente y sostenible de las masas de agua continentales los organismos encargados de la gestión de la cuenca necesitan herramientas avanzadas que permitan:

1. Control en tiempo real del nivel de cianobacterias con una alta fiabilidad, y activación de un sistema de alerta temprana.
2. Gestión a medio-largo plazo mediante la determinación cuantitativa de agentes causales y predicción. Para ello es necesario simular la dinámica de las

cianobacterias en el sistema, monitorizando en el embalse las variables ambientales que la controlan, así como una monitorización de los flujos de agua y nutrientes aportados al embalse por los principales ríos afluentes (tributarios).

En este contexto son muchas las variables que entran en juego y en cada escenario y momento será preciso adaptarse a los requisitos de contorno, por lo que las estaciones de medida deberán permitir diversidad de configuraciones en cuanto a su composición sensorial.

Para dar respuesta a estas necesidades el proyecto ROEM+ ha planteado una monitorización completa mediante diferentes tipos de estaciones de sensores que tienen como núcleo una arquitectura común modular y flexible (apdo. 4.2). A continuación se presentan las tipologías de estaciones desarrolladas y desplegadas en el proyecto ROEM+, indicando su aplicación y los parámetros monitorizados:

- **Estación de cianobacterias:**

Aplicación: Indicación de alerta de eutrofización en tiempo real para aquellos puntos de control críticos de la masa de agua (zonas de baño, de cultivo, de abastecimiento y/o de control de modelos de simulación).

Parámetros: sensores básicos de temperatura, profundidad y pH, fluorómetros de clorofila (biomasa de algas, estado trófico), ficocianinas (biomasa de cianobacterias, riesgo de toxicidad) y turbidímetro (transparencia del agua y corrección de influencia de sólidos no algales en las lecturas del fluorómetro de clorofila).

Para sistema de alerta en aguas de baño en el embalse. Se han instalado 2 estaciones de cianobacterias, una en Playa Pita y la otra en la zona de entrada de los principales tributarios (ríos Duero y Revinuesa).



Figura 2. Estación de cianobacterias.

▪ **Estaciones completas de ríos:**

Aplicación: Determinación cuantitativa de agentes causales y predicción. Para gestionar se requiere conocer la influencia de las fuentes de aportación en esa medida (caudal y nutrientes) en ríos tributarios del embalse. Para ello, hay que simular el comportamiento hidrometeorológico y de las fuentes de carga de nutrientes en la cuenca de drenaje (usos del suelo, agricultura, vertidos, ganadería, etc.). Esta simulación requiere a su vez puntos de control permanentes (meteorológicos y de nivel del agua) y análisis de diferentes parámetros relacionados con la generación y transporte de nutrientes.

Parámetros: caudal, temperatura del agua, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, nitratos, carbono orgánico total, sólidos en suspensión y demanda química de oxígeno.

En el proyecto ROEM+ se han diseñado para su ubicación en ríos tributarios y sus vertientes. Estas estaciones controlan la carga actual de nutrientes que recibe el embalse y la respuesta a los tratamientos complementarios que se adopten en cada una de las subcuencas de drenaje al embalse. El embalse de Cuerda del Pozo recibe las aguas de los ríos Duero y Revinuesa por la margen izquierda y Ebrillos por la

derecha siendo este último el menos relevante. Asimismo, puesto que las principales entradas de agua al embalse provienen de sus dos tributarios principales (ríos Duero y Revinuesa), se ha instalado una estación completa de río, una el principal tributario, el río Duero y así poder controlar la carga de nutrientes que recibe el embalse.

▪ **Estación portátil:**

Estación remota de río para ser empleada en campañas de medición o muestreos in-situ, en etapas de calibración o determinación de zonas críticas, para complementar las medidas remotas o para realizar labores de medición periódica en puntos donde no es necesaria una monitorización en continuo.

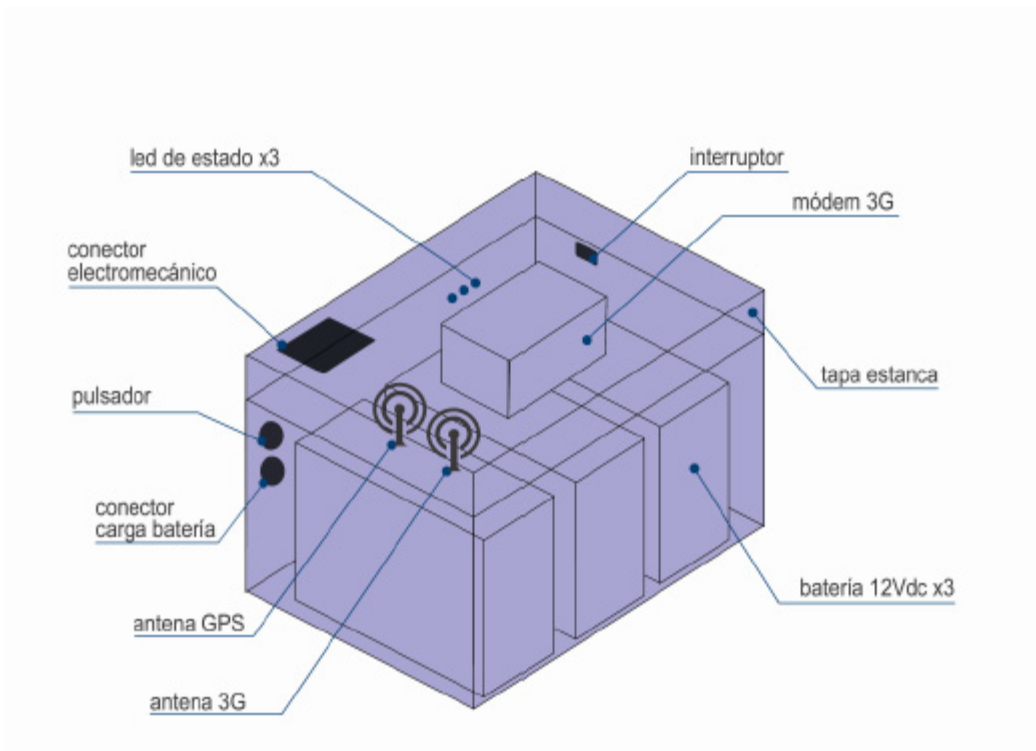


Figura 3. Esquema Estación de Monitorización Portátil.



Figura 4. Estación de Monitorización Portátil.

▪ **Estaciones meteorológicas:**

En diferentes zonas de la cuenca (tributarios) y en el embalse (campo de viento). El objetivo de estas estaciones es dotar de condiciones de contorno adecuadas a los modelos hidrometeorológicos de cuenca e hidrodinámico de embalse (generación del campo de viento). En este caso se han instalado dos estaciones meteorológicas para poder completar la red de estaciones públicas en explotación que tienen desplegadas AEMET y la CHD en el ámbito del proyecto.

▪ **Sensores de nivel del agua**

Se ubican en puntos de control críticos del modelo hidrometeorológico de cuenca, de forma que permiten calibrar su respuesta y traducir las precipitaciones en caudales, en función de las características geomorfológicas y de usos del suelo en cada subcuenca definida.

▪ **Perfiladora de Embalse:**

Consiste en una estación completa de medida, con cadencias normalmente horarias y con posibilidad de efectuar medidas en toda la columna de agua, que ha sido desarrollada por Ecohydros y el Instituto de Física de Cantabria (IFCA)

Aplicación: estado ecológico de la masa de agua y diagnóstico precoz. Se suele evaluar a partir de muestreos discretos (entre 2 y 4 al año) e incluye una serie de parámetros en perfilado vertical en los embalses. En los embalses problemáticos existe una demanda potencial de este tipo de tecnología avanzada, ya que no es posible con las pautas de los muestreos tradicionales/actuales (dirigidos a responder a los requerimientos generales de la DMA) detectar las proliferaciones de cianobacterias con suficiente fiabilidad y mucho menos anticiparlas (modelado), y tampoco los problemas que puede acarrear la eutrofización en general: degradación de calidad, malos olores y mortandades masivas de peces. Estos procesos tienen mucha relación (dinámica) con el régimen hidrológico en la cuenca (cambio climático) y también con el manejo hidráulico (pautas y profundidades de extracción de agua).

Parámetros:

- Temperatura ambiente, presión atmosférica y humedad relativa
- Radiación neta en el aire de onda corta y de onda larga
- Profundidad, temperatura del agua y conductividad eléctrica
- Oxígeno disuelto, pH y redox
- Carbonatos, nitratos, nitritos, carbono orgánico total, sólidos en suspensión y demanda química de oxígeno, mediante un sensor óptico de absorción espectral que trabaja en el rango de la luz UV
- Biomasa de cianobacterias (concentración de ficocianinas), mediante fluorómetro
- Biomasa de fitoplancton (concentración de clorofila a), mediante fluorómetro
- Materia orgánica disuelta (CDOM), mediante fluorómetro
- Irradiancia hiperespectral mediante radiómetros (en aire y agua) para obtener información sobre la cantidad y calidad de la luz para el crecimiento de las algas.

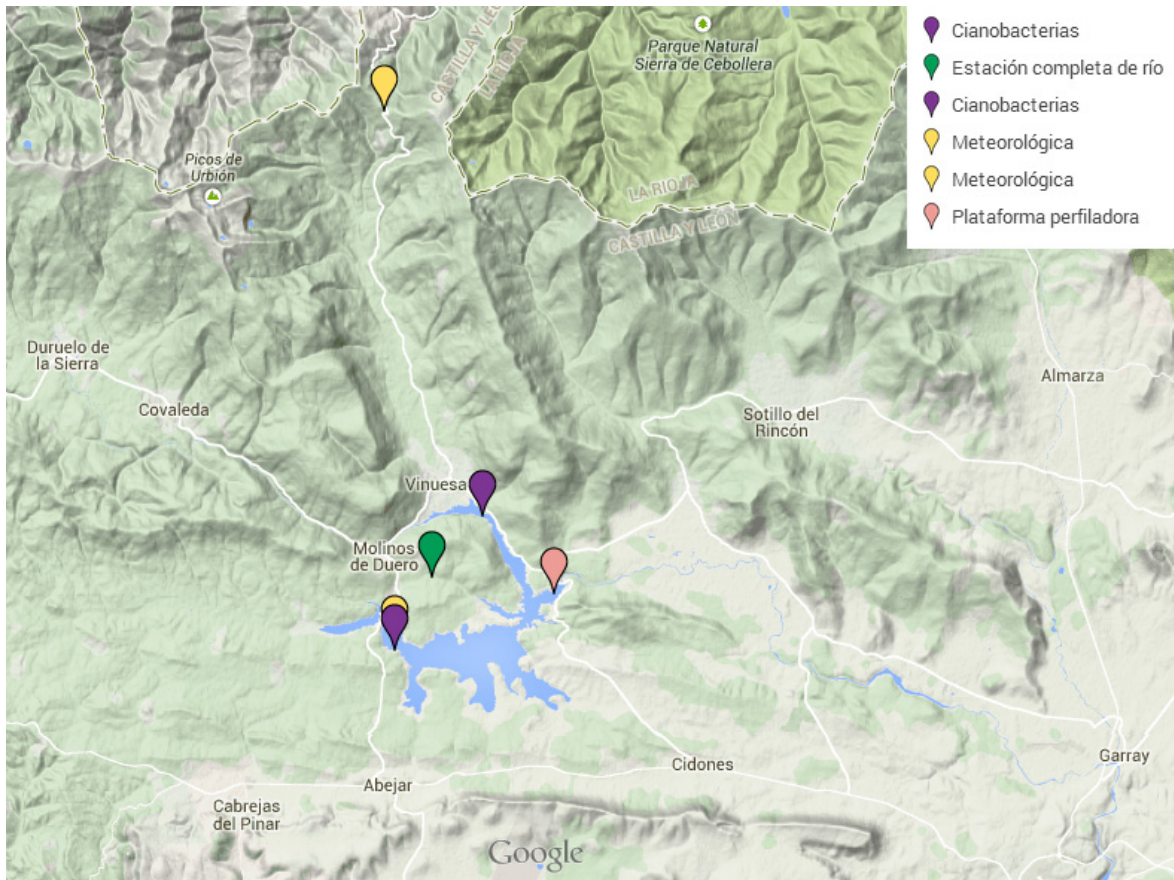


Figura 5: Estaciones desplegadas en el proyecto ROEM+

4.2. Arquitectura de las estaciones sensoras

Para la implementación de las diferentes tipologías de estaciones se ha partido de un diseño de estación modular autónoma capaz de integrar sensores de diferentes tipos y fabricantes y que proporciona el resultado de la medición en remoto y en continuo, ofreciendo toda la información necesaria (en cantidad y calidad) para alcanzar una herramienta suficientemente robusta y fiable, con las siguientes características clave:

- Sistema de adquisición de datos (DAQ) de bajo consumo, modular y escalable, que permita tanto la integración de diferentes tecnologías de sensores (físico-químicos, ópticos, etc.) con objeto de proporcionar una mayor aplicabilidad y escalabilidad a la solución.
- Arquitectura de comunicaciones que permite transmitir de manera robusta y eficiente la información de los sensores en campo a la plataforma central de procesamiento de información a través de Internet.

- Estructura modular, escalable y ajustable en función del escenario final de aplicación, que aporta plena autonomía y control remoto al Sistema de Adquisición de Datos (DAQ).



Figura 6: Dispositivo Electrónico de Adquisición y Envío de Datos “DAQ-AGUA”

El núcleo de la estación de monitorización es un dispositivo de adquisición de datos (DAQ) y se divide en cuatro subsistemas:

- Subsistema de sensorización y actuación: responsable de la interacción de la estación con el entorno que lo rodea. El juego de sensores de cada plataforma, viene definido según la tipología de estación. La diversidad de sistemas de sensorización y comunicaciones ha planteado, tradicionalmente, un reto de cara a la interoperabilidad entre diversas redes, plataformas y aplicaciones. Sensores heterogéneos, de diferentes fabricantes, operando en diferentes dominios y sin una declaración de facilidades y funcionamiento han limitado el desarrollo de soluciones complejas de sensorización y control en el ámbito acuático.
- Subsistema de procesado: el componente central de la arquitectura del DAQ inteligente, encargado de realizar el procesado de datos y de la gestión del resto de recursos de los subsistemas del nodo (i.e. comunicaciones, alimentación, sensorización y actuación). Concretamente, en el proyecto ROEM+, donde se persigue su integración en plataformas autónomas, un factor crítico es la gestión del subsistema de alimentación.
- Subsistema de comunicaciones: encargado de transmitir/recibir la información de los sensores y las órdenes de control. Dispone de una interfaz de largo alcance (vía GPRS/3G) que aporta conectividad con el Servidor Central de Información (apartado 4.3 *software de gestión remoto*).
- Subsistema de alimentación: provee de energía al resto de subsistemas. Para ello requiere de un soporte de almacenamiento y de elementos que regulen el voltaje de manera adecuada. A mayores, se pueden incluir componentes que permitan recargar energía mediante dispositivos de recolección de energía (e.g, paneles solares, pilas de combustible, etc.).

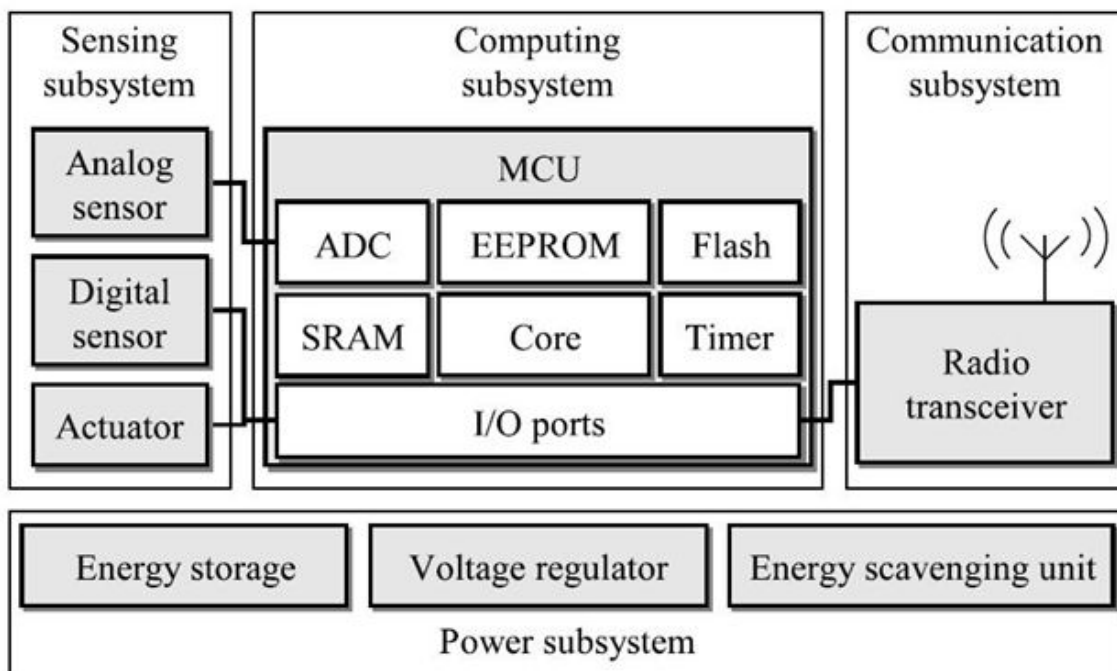


Figura 7. Arquitectura Interna de las estaciones sensoras

4.3. Software de gestión remoto.

El sistema de gestión de datos permite acceder en remoto a los datos clasificados como de calidad aceptable, después de un proceso de filtrado y análisis de calidad que debe definir el usuario.

El acceso a los datos se habilita a través de un portal web específico, en el que se puedan realizar consultas y visualizaciones gráficas por parámetros, periodos y profundidades. Se habilita también la opción de descargar esos datos en un formato de texto, csv o equivalente.

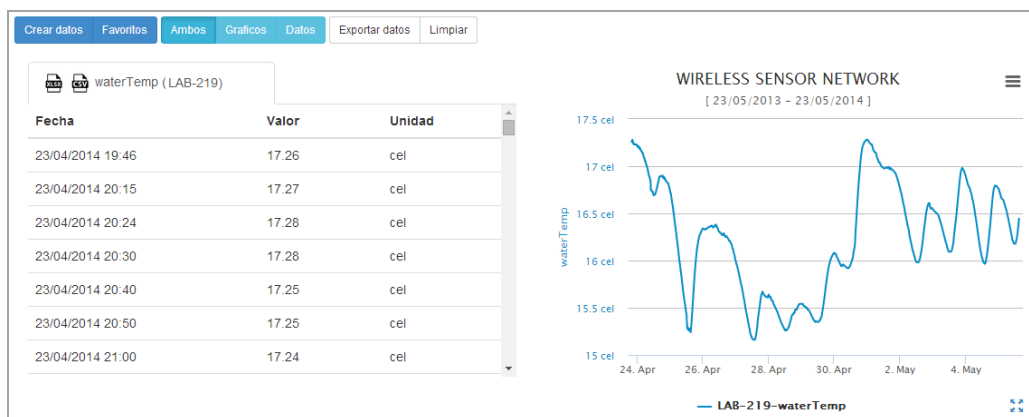


Figura 8. GIS-WEB de Visualización y Acceso a los Datos Remotos

Como principales características y funcionalidades se destacan las siguientes:

✓ **Gestión de procesos**

Se definen los procesos como elementos que tienen una serie de entradas, salidas y parámetros y que pueden tener o no una localización y un método de transformación. Un proceso puede estar compuesto por otros procesos a través de enlaces entre entradas y salidas de los componentes. A partir de esta definición pueden modelarse como procesos tanto sensores, sistemas sensoriales, como modelos sencillos (medias, transformaciones lineales) y complejos (modelos de predicción).

✓ **Elevado número de observaciones**

Se entiende por observación una representación (generalmente numérica) de una propiedad de un elemento de interés en un instante temporal concreto.

El número de estas observaciones debe ser elevado, no sólo por la información que ofrecen, sino por la información que puede inferirse a través de modelos, o su utilidad a la hora de validar nuevos modelos.

✓ **Representación geográfica avanzada**

Tanto para facilitar la búsqueda y gestión de elementos georreferenciados (sensores, zonas de muestreo, etc.) como para obtener representaciones avanzadas de las observaciones (a través de capas geográficas, etc.) se dispone de tecnología y prestaciones GIS.

✓ **Actuación remota**

El sistema permite realizar las tareas más habituales en los sistemas de captación de forma remota. De esta forma se evitan gran parte de los desplazamientos al lugar del despliegue de los sensores para tareas de mantenimiento y se pueden gestionar cambios de configuración sin necesidad de acceder físicamente a la plataforma sensorial.

✓ **Alertas y eventos complejos**

Se permite la configuración de alertas para que cuando un parámetro alcance un cierto valor, se notifique a los usuarios mediante un e-mail y/o SMS. Además, puede definirse una histéresis para cada alerta, con el objetivo de evitar recibir la misma alerta de forma continua.

Es posible la generación de datos agregados mediante la aplicación sobre diferentes conjuntos reales o a su vez también virtuales. Esto se consigue mediante la ejecución de Modelos.

El sistema gestor de datos y procesos está planteado para que se tomen observaciones de forma autónoma, es decir, sin una manipulación o presencia de un administrador o usuario. Es importante, por tanto, que el sistema gestor pueda avisar al administrador o usuario de información que estos consideren importante. Esta información puede ser, desde un fallo en las comunicaciones o en algún sensor, como la detección de un valor fuera de un rango preestablecido o resultados importantes en los modelos de predicción.

Se diseña un sistema de publicación/subscription que responda tanto a alertas sencillas relativas al mantenimiento o a los datos captados como a eventos complejos resultado de modelos.

A continuación se especifica la arquitectura de base para el sistema.

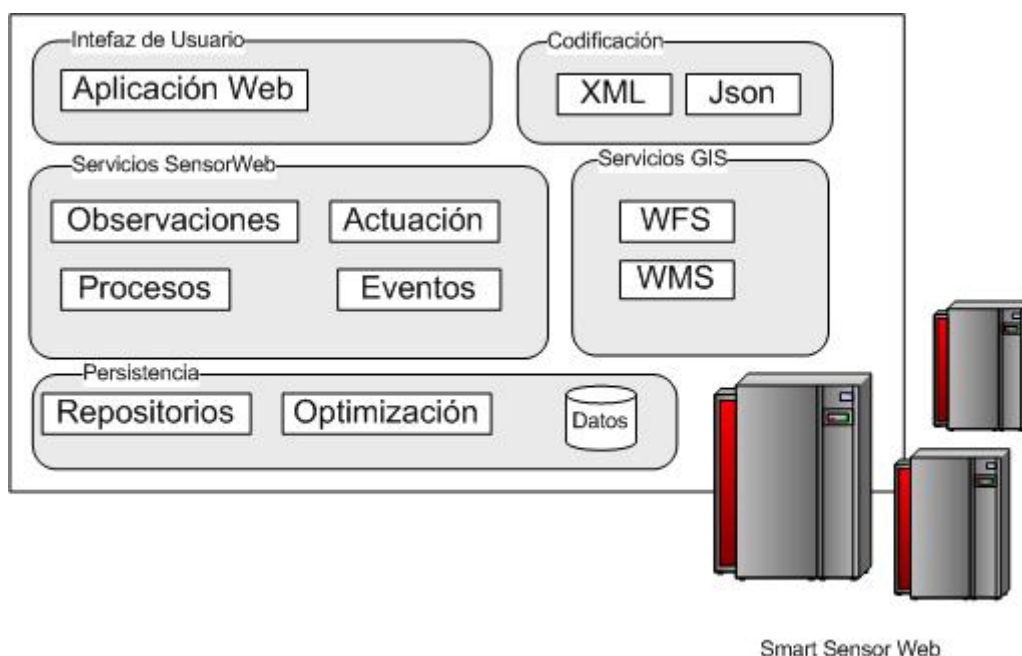


Figura 9: Arquitectura del Gestor de Datos y Procesos

Persistencia

En un sistema como el requerido donde el número de datos a almacenar es muy elevado, el diseño del sistema para la persistencia de datos es crítico. Se han empleado herramientas de mapeo objeto-relacionales (ORMs) concretamente Hibernate. También se han empleado bases de datos no relacionales como MongoDB para abstraer a los servicios smart-web y GIS del sistema de persistencia utilizado (Relacional, no-relacional, mixto, etc.).

Servicios SensorWeb

Los servicios SmartWeb toman como base las definiciones de la SensorWeb realizadas por la iniciativa Sensor Web Enablement (SWE) de la OGC (Open Geospatial Consortium).

En esta iniciativa se distinguen, entre otros, servicios relativos a la gestión de procesos, observaciones, procesos y eventos.

Estos servicios estarán vinculados a interfaces para su acceso por sistemas de terceros, interfaces de usuario, aplicaciones ricas de internet RIAs, etc. Se han empleado interfaces REST (Representational State Transfer) y POX (Plain Old Xml).

Servicios GIS

El gestor de datos y procesos debe proporcionar un sistema de información geográfico (GIS) para gestionar los elementos georreferenciados. El acceso y modificación de estos elementos se realiza a través de interfaces estándares definidas por la Open Geospatial Consortium (OGC). Las interfaces básicas a implementar son la Web Feature Service (WFS) para gestionar los elementos georreferenciados y la Web Map Service (WMS) para la gestión de Mapas geográficos.

Codificación

Los datos incluidos en el gestor de datos y procesos deben ser codificados para su compartición entre los servicios definidos. En la actualidad, la tendencia es la codificación de los datos de forma textual, y XML y Json son las tecnologías más utilizadas. La iniciativa Sensor Web Enablement (SWE) está muy orientada a XML, mientras que Json es la solución más natural para servicios REST, que ofrece mayor eficiencia que XML, conservando gran parte de sus capacidades de descripción.

Para la codificación de datos en XML se plantearán herramientas como Apache XMLbeans, mientras que para la codificación Json la herramienta de referencia ha sido Jackson.

Interfaz de Usuario

La interfaz de Usuario se encarga de ofrecer una interfaz gráfica amigable para que el usuario acceda a los servicios del sistema gestor. Se opta por la implementación de aplicaciones web, lo que aumenta la interoperabilidad con respecto a aplicaciones de escritorio, además de simplificar las actualizaciones posteriores realizadas en el sistema.

Entre las tecnologías existentes para aplicaciones web se hará un uso extensivo de Javascript y Ajax. Dada la complejidad del sistema planteado se han utilizado frameworks Angular JS para facilitar la implementación.

5. Conclusiones

El sistema de monitorización integral desarrollado en el proyecto ROEM+ representa una valiosa herramienta para la evolución hacia un nuevo enfoque en el ámbito de la gestión de las aguas continentales teniendo en cuenta criterios de sostenibilidad económica y medioambiental.

Con respecto a los sistemas de control y monitorización actuales será posible llevar a cabo una gestión optimizada de la eutrofización y contaminación (algas tóxicas). En base a la información del sistema de monitorización integral de cuenca hidrográfica presentado será posible evaluar, en términos de estado ecológico, los efectos conjuntos de diferentes procesos naturales y de presión, incluyendo el del cambio climático (modelo meteorológico), usos del territorio, gestión agropecuaria y forestal, etc. El sistema posibilita predecir el rendimiento de diferentes combinaciones de medidas correctoras, tanto en la cuenca como en el propio embalse, con la consiguiente minimización de incertidumbres y costes.

Todo esto es posible mediante los siguientes pilares técnicos en los que se sustenta el desarrollo del proyecto ROEM+:

- a) Adecuada Resolución Espacial: abordar el trabajo en el ámbito geográfico relacionado con la masa de agua, en este caso la cuenca hidrográfica que drena al embalse (cuantificación y localización del origen de las cargas de contaminantes y nutrientes).
- b) Adecuada Resolución Temporal: disponer de datos permanentemente actualizados de una serie de variables, a una resolución espacio-temporal suficiente como para que la incertidumbre sea asumible. Esto sólo es posible con un sistema de monitorización remota en tiempo cuasi-real, al que se tenga acceso a través de servicios web.
- c) Capacidad Analítica Intensiva: generación de simuladores dinámicos y espacialmente distribuidos, que resulten adecuados para los procesos y elementos clave, tanto de los ecosistemas como de las presiones antrópicas, incluyendo el cambio climático. Esto permite realizar predicciones, entender lo que está ocurriendo y plantear escenarios complejos de actuación y gestión.

La integración de estos tres pilares en el ciclo y comportamiento del agua en toda la cuenca y cursos de agua proporcionará las bases para establecer los siguientes resultados específicos:

- Control a largo plazo del cambio climático
- Mejora de la planificación y gestión hidrológica
- Evaluación del Riesgo y sistemas de alarma de proliferación de algas tóxicas

- Reciclado (cierre del ciclo de fósforo)
- Sistemas de Información Medioambiental en tiempo cuasi-real
- Implementación mejorada de la DMA
- Plataforma de Información accesible por otros actores medioambientales y gestores del territorio
- Un modelo (caso de éxito y estudio) con carácter demostrador para ser exportado a otras cuencas

Además, la mejora de la calidad y la gestión del agua, tiene repercusiones también en la protección de la biodiversidad y del capital natural, en la mejora del paisaje y la promoción de espacios sanos. Estos servicios son esenciales para la vida humana y proporcionan las condiciones de las que muchas actividades económicas dependen (turismo, actividades recreativas, agricultura, ganadería, pesca...).

Los servicios de gestión ambiental vitales como monitorización de la calidad del agua pueden valorarse también indirectamente comparando el coste de las intervenciones necesarias para la descontaminación/recuperación de la calidad del agua. El valor total de la restauración (calidad del agua y conservación de las especies acuáticas) se valora en 162 - 278 millones de € / año [9].

6. Agradecimientos

El proyecto LIFE ENV/ES/590 ROEM+ “Gestión Avanzada de la Eutrofización de Aguas Superficiales en Territorio Rural de la Cuenca Hidrográfica del Duero”, cuenta con la contribución del instrumento financiero LIFE de la Unión Europea.



7. Información adicional

WEB del proyecto ROEM+: www.roemplus-life.eu

Otras iniciativas en curso relacionadas con la Gestión Sostenible del Agua:

www.saneplan-life.eu Planificación integrada y gestión sostenible de infraestructuras de saneamiento mediante el desarrollo de un Sistema de Información que permita contar con datos fiables y exactos para un adecuado dimensionamiento y planificación en función de las necesidades actuales y las previsiones futuras bajo condicionantes de coste, protección medioambiental, población y cambio climático. Financiado por el programa LIFE + de la Comisión Europea. Ámbito de Actuación: Toscana (IT), Galicia (ES).

www.wiz-life.eu Gestión del agua y la planificación urbana. Integración de la protección y gestión sostenible del agua en los procesos de planificación urbana y del ambiente edificado en general teniendo en cuenta los impactos del cambio climático.

Cofinanciado por el programa LIFE + del a Comisión Europea. Ámbito de Actuación: Toscana (IT), Galicia (ES).

www.baiona.org Web del Concello de Baiona, con acceso al sistema WIZ de la localidad

<http://www.klink.it/gate/asap> Acciones para evitar la sobreexplotación de acuíferos subterráneos mediante la optimización de redes de distribución basado en el modelado matemático, calibración, segmentación y control activo de la presión en franjas nocturnas. Proyecto financiado por el programa LIFE de la comisión europea. Ámbito de Actuación: Toscana (IT) Galicia (ES)

www.wetnet.it. Tecnologías de bajo coste para la monitorización de redes de distribución de agua y detección de fugas mediante caudalímetros con inserción hot-tap y sistemas de supervisión sobre tecnología web en tiempo real. (Financiado por el programa ECOINNOVACION de la Unión Europea).

8. Referencias

- [1] European Communities, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for the Community action in the field of water policy. OJ L 327/1, 23/10/2000.
- [2] EEA (European Environment Agency). Environmental Indicator Report 2012. Ecosystem Resilience and Resource Efficiency in a Green Economy in Europe. ISBN: 978-92-9213-315-3. Luxemburgo. 2012.
- [3] EEA (2012). European Environment Agency. Water assessments 2012.
- [4] European Communities, 2006. Directive 2006/44/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 on the quality of fresh waters needing protection or improvement in order to support fish life. L 264/20. 25/9/2006.
- [5] European Communities, 1991. Directive 91/271/EEC. Council Directive of 21 May 1991 concerning urban waste water treatment. O.J. L135/40, 30/5/91.
- [6] European Communities, 1991. Directive 91/676/EEC of the European Parliament and of the Council Directive of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. OJ L375/1, 31/12/91.
- [7] European Communities, 2009. Technical Report - 2009 - 030. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). Guidance document no. 23. Guidance Document on Eutrophication Assessment in the Context of European Water Policies. ISBN 978-92-79-12987-2. 2009.
- [8] European Commission, 2010. Report from the Commission to the Council and the European Parliament on implementation of Council Directive 91/676/EEC concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources for the period 2004–2007 SEC(2010)118. 2010.
- [9] European Commission and UNEP. The Economics of Ecosystems and Biodiversity “TEEB”. Meyerhoff. ISBN-13 978-92-79-08960-2. Alemania. 2008.
- [10] European Environment Agency. WISE WFD Database. http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/wise_wfd.