

Facultad de Ciencias

# Monitorización de la calidad del agua en embalses mediante técnicas de observación remota

(Water Quality monitoring in impoundments by means of remote observation technics)

Trabajo de Fin de Grado para acceder al

# **GRADO EN FÍSICA**

Autor: Inés Martínez García

Director: Jesús Marco de Lucas

**Co-Director: Daniel García Díaz** 

Septiembre - 2017

## Agradecimientos

Primero me gustaría agradecer a mi director Jesús Marco y a mi codirector Daniel por orientarme, ayudarme y tener siempre la puerta abierta para cualquier duda o problema que pudiera tener.

A la universidad de Cantabria, al IFCA y a todos los profesores, que, de una u otra manera, me han enseñado y se han preocupado por ello.

A mis padres, a Laura y a Cédric, por escucharme, apoyarme y estar siempre ahí, en mis mejores y peores momentos. A mis amigos y compañeros, que, conociéndolos en diferentes etapas de mi vida, me han aportado innumerables cosas. Y, en general, a las personas cercanas que forman parte de mi vida y que influyen positivamente en ella.

A todos ellos, de los que aprendo cada día y por los que, a día de hoy, soy quien soy. Gracias.

# Índice

Resun	nen	4
Abstra	act	5
1. Intr	roducción y objetivos	6
1.1.	La calidad del agua	7
1.1	1.1. La eutrofización	8
1.1	1.2. Parámetros que indican la calidad del agua	9
1.2.	Contexto: Los embalses estudiados	13
1.2	2.1. Embalse de Cuerda del Pozo (CdP)	14
1.2	2.2. Embaise de Castro de las Cogotas	15
2. Lo	os satélites de observación de la Tierra	. 16
2.1.	Contexto histórico	16
2.2.	Características técnicas de los satélites y los instrumentos a bordo	17
2.3.	La función de los satélites en la calidad del agua	19
2.4.	Descripción de los satélites utilizados	20
2.4	4.1. Sentinel-2	20
3. Da	atos requeridos y Metodología	. 23
3.1.	Medidas in-situ en los embalses	23
3.2.	Datos proporcionados por los satélites	26
3.3.	Metodología de comparación de datos	29
3.4.	Estimación del nivel de clorofila a partir de las imágenes multi-espectrale	es de
satél	lites	31
4. Re	esultados y análisis	. 32
4.1.	Medidas de clorofila en el embalse de Cuerda del Pozo	32
4.2.	Espectro de reflectancia medido desde satélites	33
4.3.	Correspondencia entre medidas tomadas in situ y valores estimados medi	ante
satél	lite	36
4.4.	Análisis	37
4.5.	Posibles medidas de mejora y trabajo adicional	38
5. Co	onclusiones	. 39
6. Bi	ibliografía	. 41

7. Ap	éndices	43
7.1.	Glosario	
7.2.	Códigos utilizados	
7.2.	1. Python	44
7.2.	2. Google Earth Engine	45

#### Resumen

En este trabajo se estudia el interés de las técnicas de observación remota de la tierra mediante satélites para estimar la calidad del agua en embalses y lagos. Una de las razones de este interés es el despliegue en los últimos años de nuevos satélites, como el Sentine l-2 y el Landsat-8, con mejor instrumentación, resolución y frecuencia de observación.

El principal parámetro considerado es la concentración de clorofila en el agua, ya que valores altos del mismo indican posibles problemas de eutrofización, que afectan gravemente a la calidad del agua embalsada.

Para ello se han utilizado las imágenes multiespectrales proporcionadas por los satélites, analizando las bandas que están relacionadas con el espectro de reflectancia de la masa de agua que es característico de la presencia de clorofila. Se han empleado diferentes herramientas de manejo de estas imágenes, y se han considerado algunos posibles estimadores de dicha presencia de clorofila.

Se ha aplicado el método desarrollado al estudio de los embalses de Cuerda del Pozo en Soria y Castro de las Cogotas en Ávila, en los que se dispone de medidas propias de la concentración de clorofila obtenidas mediante instrumentación in-situ en los últimos años, y se han comparado los resultados obtenidos.

Se concluye que este tipo de métodos pueden ser de gran interés para la monitorización continuada de embalses y lagos afectados por estos problemas.

*Palabras clave:* Observación remota, calidad de agua, embalse, Sentinel-2, Landsat-8, clorofila-a, bandas espectrales, Cuerda del Pozo, Castro de las Cogotas.

### Abstract

The interest of remote sensing technics on Earth by means of satellites for estimating water quality on water reservoirs and lakes is studied in this work. One of the reasons of this interest is the launch of new satellites, such as Sentinel-2 or Landsat-8, with better instrumentation, resolution and observation frequency, in recent years.

The main parameter considered here is the chlorophyll concentration in water, since high values indicate possible problems of eutrophication, which may seriously affect the collected water quality.

For that purpose, multispectral imagery provided by some satellites has been used, analysing bands relating the body water spectral reflectance characteristic with the presence of chlorophyll. Different management imagery tools have been used, and possible estimators of its presence have been considered.

The method developed has been applied to the study of Cuerda del Pozo and Castro de las Cogotas water reservoirs, in Soria and Ávila respectively, where there are measurements of concentration of chlorophyll available obtained with in situ instrumentation in the last years. A comparison between these measurements and the results achieved has been carried out.

It is concluded that this type of methods may be highly relevant to the continuing monitorization of impoundments and lakes affected by these problems.

*Key words:* Remote sensing, Earth observation, water quality, water reservoir, impoundment, Sentinel-2, Landsat-8, chlorophyll-a, spectral bands, Cuerda del Pozo, Castro de las Cogotas.

### 1. Introducción y objetivos

En primer lugar (apartado 1.1. La calidad del agua) se va a presentar el problema de la calidad de agua en los lagos y embalses y los parámetros relacionados que intervienen en su evaluación, introduciendo un concepto clave: la eutrofización. La valoración y monitorización de la calidad del agua, como es bien sabido, es muy importante tanto para la salud humana como para la de otros muchos organismos que habitan o están en interacción con él, además de por otros factores económicos y sociales.

En la actualidad están extendiéndose nuevas técnicas para monitorizar masas de agua. Una de las más interesantes es realizar esa monitorización de manera remota, por medio de imágenes proporcionadas por satélites, que es el tema que se va a abordar en este trabajo.

Para hacer este estudio de forma realista, se han seleccionado dos embalses, Cuerda del Pozo en Soria y Castro de las Cogotas en Ávila, en los que se dispone de medidas insitu de calidad de agua de los últimos años. Se explicarán sus características y su contexto actual en el apartado *1.2. Los embalses*.

En la sección 2. Los satélites de observación de la Tierra, se hablará sobre los satélites de observación terrestre más relevantes en funcionamiento actualmente, de la Agencia Espacial Europa, ESA, la serie SENTINEL, y por parte de la NASA, los LANDSAT; describiendo brevemente sus objetivos, las características técnicas de aquellos que nos interesan y qué medidas nos proporcionan.

Después, en la sección *3. Datos requeridos y Metodología*, se hablará, por un lado, de los tipos de datos requeridos para llevar a cabo este estudio, y por otro, del procedimiento empleado para ello. En primer lugar, se introducirá la principal instrumentación de medida para obtener los parámetros in-situ y cómo acceder a ellos, mostrando como ejemplo los valores posibles de adquirir, en forma de tabla y de gráfica, poniendo especial atención en la concentración de clorofila. Después se explicarán los datos que proporcionan los satélites SENTINEL-2 y LANDSAT-8 y se mostrarán como ejemplo algunas imágenes tratadas con esos datos. Finalmente, se explicará la metodología llevada a cabo mediante el uso de los diferentes programas empleados, como el SNAP, Google Earth Engine o scripts propios en Python, y se mostrarán los estimadores seleccionados para la determinación de la clorofila en los embalses de Soria y Ávila.

Una vez aplicada la metodología descrita, la sección 4. Resultados y análisis expone los mismos, para a continuación realizar su análisis. En el mismo apartado se hará una comparativa entre los datos medidos in-situ en cada embalse con los obtenidos con los satélites. Además, se sugerirán posibles mejoras que se podrían efectuar con el fin de conseguir unas medidas más precisas o que se pudieran ajustar mejor a los valores reales (tomando como "reales" los obtenidos directamente en cada embalse) utilizando las imágenes de los satélites.

Finalmente, se presentan varias conclusiones generales y algunas más específicas sobre el método utilizado, los análisis llevados a cabo y la realización del trabajo en general (sección 5. *Conclusiones*).

#### 1.1. La calidad del agua

El agua es hoy en día uno de los recursos más importantes para el ser humano y para el resto de organismos de la Tierra. Con el aumento de la población y el progreso de la industria cada vez es mayor la importancia de una buena evaluación de la calidad del agua en lagos, embalses y otras masas de agua en el mundo. Debido a esto, grande es el esfuerzo involucrado en este campo para encontrar las mejores técnicas e instrumentos para monitorizar y gestionar los recursos hídricos presentes en la Tierra.

Normalmente la calidad del agua se determina a partir del análisis de muestras de agua que periódicamente recolectan equipos de personal en estaciones de monitoreo. Estos resultados son vitales para poder registrar tendencias espaciales y temporales tanto en aguas superficiales como subterráneas. Además, la evaluación de estos datos de monitoreo también tiene como propósito averiguar cómo las actividades humanas realizadas en el paisaje influencian en la calidad del agua, tanto negativa como positivamente.

En el medio natural, el agua contiene muchas sustancias disueltas y otras partículas no disueltas. Los minerales y sales disueltos son componentes necesarios para una buena calidad del agua, ya que ayudan a mantener la salud de los organismos relacionados con el ecosistema. Aunque, por otro lado, también puede contener sustancias perjudiciales para la vida. Entre estas se incluyen algunos metales, como el mercurio, el plomo o el cadmio, pesticidas, toxinas orgánicas y contaminantes radioactivos. Además, la inmensa mayoría de fuentes naturales contiene organismos vivos que son componentes fundamentales de los ciclos biogeoquímicos<sup>1</sup> en los ecosistemas acuáticos. Sin embargo, algunos de ellos son perjudiciales para el ser humano si se encuentran presentes en el agua que se destina al consumo (UNEP GEMS Water Programme with UNESCO, 2008).

Esto es, la calidad de una masa de agua, sea superficial o subterránea, se define en función de las influencias naturales y las actividades humanas. Se determina comparando las características físicas y químicas de una muestra de agua con estándares o guías de referencia de calidad de agua. Estos niveles están establecidos para asegurar la salud humana y están basados generalmente en niveles de toxicidad aceptables tanto para las personas como para organismos acuáticos que han sido evaluados científicamente.

La composición física, química y biológica del agua afecta la habilidad de un ambiente acuático a mantener un ecosistema saludable. Y la calidad de agua requerida para que así sea depende fuertemente de las condiciones ambientales naturales. Algunos ecosistemas son capaces de resistir grandes cambios en la calidad de las aguas sin efectos perceptibles mientras que otros más sensibles sólo con pequeñas

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Los ciclos biogeoquímicos se refieren al movimiento de los elementos que forman los organismos biológicos (bio) y el ambiente geológico (geo) y que sufren transformación química mediante los procesos de producción y descomposición. Este ciclo es vital, puesto que gracias a él se recicla la materia y los nutrientes, que son limitados, necesarios para el mantenimiento de la vida en la Tierra.

variaciones ya pueden dar lugar a una degradación del ecosistema o a pérdidas de biodiversidad.

La degradación de la calidad de agua por parámetros físicos y químicos debido a la influencia humana es frecuentemente gradual, y puede que sutiles adaptaciones de estos cambios del ecosistema acuático no sean detectadas hasta que no tenga lugar un cambio brusco en las condiciones del ecosistema. Este es el caso del crecimiento masivo de algas causadas por la eutrofización, proceso explicado en la siguiente subsección.

#### 1.1.1. La eutrofización

La eutrofización, o sobrecarga de nutrientes, implica un excesivo crecimiento de plantas y algas, característica principal de este proceso. Este hecho se debe a un aumento de la disponibilidad de uno o más factores necesarios para la fotosíntesis, tales como la luz solar, el dióxido de carbono y nutrientes fertilizantes (Chislock, Doster, Zitomer, & Wilson, 2013).

Cuando la eutrofización está presente en una masa o cuerpo de agua se manifiestan varias consecuencias. Una de ellas es el aumento de la producción primaria<sup>(1)</sup>, lo que puede causar un excesivo crecimiento de algas. Estas consumen más oxígeno, aumentando la DBO <sup>(2)</sup> –Demanda Bioquímica de Oxígeno– (o BOD, de las siglas en inglés Biochemical Oxygen Demand) y causando la muerte de muchos peces y animales.

Se considera que la abundancia de nitrógeno (N) y fósforo (P) (que son la mayor parte de los elementos que componen las células de los organismos) son los principales nutrientes causantes de la eutrofización (UNEP GEMS Water Programme with UNESCO, 2008).

Este proceso puede incluso llevar a producir un crecimiento de una excesiva cantidad de cianobacterias<sup>(3)</sup> (algas verde-azules), dando lugar a lo que se conoce como CHABs (Cyanobacteriae Harmful Algae Blooms), que liberan toxinas. Son densas acumulaciones de células en la superficie de lagos eutróficos o mesotróficos o de embalses de agua (Hoyos, Negro, & Aldasoro, 2004) que se



producen principalmente durante bs meses de verano y los primeros de otoño. Estas pueden amenazar tanto la salud humana como la animal V producir consecuencias socioeconómicas.

Figura 1: Ejemplo de eutrofización en el lago Okeechobee, Florida, que se dio en torno al mes de julio del 2016. Fuente: https://www.nauticalnewstoday.com/10-millones-de-dolares-algas-florida/

Para estimar el nivel de eutrofización de una masa de agua, el parámetro que normalmente se mide es la clorofila-a, que es el pigmento asociado al color verde predominante en el proceso de la eutrofización, reflejando el crecimiento de las algas.

Una masa de agua puede ser clasificada en función de la cantidad de clorofila<sup>(4)</sup> presente en ella: puede ser hipertrófica, con un nivel de clorofila-a mayor de 30 µg/l (las unidades de medida habituales), o 30 mg/m<sup>3</sup> en el sistema internacional, eutrófica (con nivel de clorofila-a comprendido entre 20 y 30 µg/l), mesotrófica (con una clorofila-a de 10-20 µg/l) y oligotrófica (con niveles de clorofila-a menores de 10 µg/l) (Matthews & Bernard, 2015).

Este proceso siempre se ha producido de forma natural, pero desde hace décadas, el ser humano ha sido uno de los principales responsables del incremento de su frecuencia por varias causas. Entre ellas se encuentran los vertidos procedentes de la agricultura (que utiliza abonos ricos en nitrógeno y fosfatos) y la industria y la descarga de residuos municipales en ríos y lagos (Chislock, Doster, Zitomer, & Wilson, 2013). Debido a esto, es importante tener una buena gestión de las actividades humanas que afectan la calidad de las aguas y registrar y evaluar los parámetros implicados en la eutrofización.

#### 1.1.2. Parámetros que indican la calidad del agua

El estudio de la calidad del agua es el proceso de determinar las características químicas, físicas y biológicas de masas de agua e identificar las posibles fuentes de contaminación que degradan la calidad del agua. La degradación de la calidad de los medios acuáticos puede ser consecuencia de descargas de desechos, pesticidas, metales pesados, nutrientes, micro-organismos y sedimentos. Se han desarrollado diferentes estándares de la calidad del agua para comprobar el alcance de la contaminación del agua y para realizar el mantenimiento de los mismos.

Varios son los parámetros que determinan la calidad de agua en un lago o en una masa de agua. Debido a la importancia de una buena evaluación del agua, hay muchos artículos que hablan sobre ello y sobre la repercusión de los diferentes parámetros en la eutrofización de las aguas. Uno de ellos (L. Carvalho, 2012) señala que tres de las medidas más fuertes para medir la calidad ecológica de los lagos son la **clorofila-a**, el índice trófico de **fitoplancton** <sup>(5)</sup> (PTI, de las siglas en inglés, Phytoplankton trophic index) y el biovolumen de **cianobacterias**. Este asegura que el fitoplancton es el indicador más directo de los impactos del cambio de nutrientes en un ecosistema (lo que se refleja en los "blooms" de algas). Otro artículo (M. Medina-Cobo, 2014), que se encarga principalmente de estudiar la detección de biovolumen de cianobacterias en embalses de agua, también está de acuerdo en los parámetros citados arriba. Este expone que el desarrollo de cianobacterias se estimula enormemente con la eutrofización y el exceso de nutrientes en el agua, y añade que en estudios limnológicos, el nivel de eutrofización se evalúa cuantificando la biomasa de fitoplancton y clorofila-a.

Otro estudio evalúa cuáles son los enfoques utilizados más comunes y concentra en once los parámetros usados para estimar la calidad de agua. Estos

son la **clorofila-a** (clor-a), la materia orgánica disuelta cromófora **CDOM** (del inglés "colored disolved organic matter"), la profundidad del disco de Secchi (SDD), la **turbidez**, los sedimentos suspendidos totales (**TSS**), la **temperatura** del agua, la cantidad total de fósforos (TP), la salinidad superficial del mar (SSS), el oxígeno disuelto (DO), la demanda bioquímica de oxígeno (BOD) y la demanda química de oxígeno (COD) (Gholizadeh, Melesse, & Reddi, 2016).

Pero todos estos parámetros no serán tratados aquí, solo algunos de ellos. Se explican brevemente sus características y la manera en la que afectan a la calidad del agua:

*Clorofila-a:* Es el mayor indicador del estado trófico porque actúa como una conexión entre la concentración de nutrientes, particularmente fósforo, y la producción de algas (Gholizadeh, Melesse, & Reddi, 2016). Es el principal pigmento de la clorofila en la fotosíntesis mostrando un color verde hierba. Sus picos de absorción se encuentran en las longitudes de onda situadas entre los 430 y 662 nm (Olmo & Nave, s.f.). Está presente en las algas que viven en la parte superior de masas de agua (el fitoplancton).

*Turbidez:* Es una determinación óptica de la calidad del agua. Se basa en la cantidad de luz dispersada por partículas presentes en la columna de agua. Cuantas más partículas haya, mayor será la luz dispersada. Por lo tanto, la turbidez y los sedimentos suspendidos totales están relacionados. El agua turbia aparece revuelta, oscura, afectando la apariencia física del agua. Los sólidos suspendidos y la materia disuelta cromófora reducen la claridad del agua creando una apariencia opaca, borrosa o sucia. La medida de la turbidez se usa frecuentemente como un indicador de la calidad del agua basado en la claridad y en los sólidos suspendidos suspendidos.

Sedimentos suspendidos totales (TSS): Partículas mayores a 2 micras que se encuentran en la columna de agua. Si es menor que dos micras es considerado un sólido disuelto. La mayor parte de los sólidos suspendidos están hechos de materiales inorgánicos, aunque bacterias y algas también pueden contribuir a la concentración total de sólidos.

*Claridad del agua:* Característica física definida por la transparencia del agua. La claridad se determina por la profundidad que la luz del Sol penetra en el agua. Cuanta más distancia alcance, mayor será la claridad del agua. Está directamente relacionada con la turbidez, ya que la turbidez es una medida de la claridad del agua. A la transparencia del agua le afecta la cantidad de luz de sol disponible, las partículas suspendidas en la columna de agua y sólidos disueltos presentes en el agua como la materia orgánica disuelta cromófora (CDOM) (Fondriest Environmental, Inc, 2014).

*CTD* (*Conductivity, Temperature, Depth* – Conductividad, Temperatura y Profundidad):

• *Conductividad:* Mide la capacidad del agua de conducir una corriente eléctrica, y es proporcional a la concentración de iones en una solución. Se usa frecuentemente como sustituto de medidas

de salinidad y es considerablemente mayor en sistemas salinos que en no salinos. Además, la habilidad del agua y sus solutos en conducir la electricidad está influenciada por la temperatura. Mayores temperaturas aumentan la conductividad.

Temperatura: Afecta a la velocidad de las reacciones químicas: el ritmo al que las algas y plantas acuáticas realizan la fotosíntesis, el ritmo metabólico de otros organismos y cómo contaminantes, parásitos y otros patógenos interaccionan con los organismos propios del sistema acuático. La temperatura es importante en los sistemas acuáticos porque puede influenciar la solubilidad del oxígeno disuelto (DO) y otros materiales en la columna de agua e incluso causar mortalidad.

Como ya se ha comentado, el "bloom" (o proliferación) de algas, es un crecimiento masivo de algas en una determinada masa de agua, producida principalmente en los meses de verano y en los primeros de otoño. Y la **clorofilaa**, pigmento verde característico del fitoplancton (las algas que se encuentran en la superficie de las masas de agua) va a ser el parámetro determinante para su detección. Abajo se muestra el espectro de absorción de la clorofila-a (Figura 2).



Figura 2: Espectro de absorción de la clorofila a (en verde) y b (en rojo).

Observando el espectro de absorción de la clorofila uno podría tener una idea aproximada de cuál sería la del espectro forma de reflectancia, puesto que la luz que no se absorbe es reflejada. Entonces, aquellas longitudes de onda a las que les correspondería un máximo en el espectro serían las que se encontrasen entre aproximadamente 500 y 600 nm y otro a 700 nm, donde la absorción de la clorofila-a es nula. La

gráfica del espectro de reflectancia de la clorofila sería más interesante para el tema que se va a abordar, puesto que muestra las longitudes de onda que la clorofila refleja y por tanto las que los satélites podrían ser capaces de captar. En la Figura 3 se muestra este espectro, típico de un lago hipertrófico, en el que predomina el fitoplancton y, por lo tanto, la reflectividad de la clorofila-a.



Figura 3: Espectro de reflectividad del agua típico de un lago hipertrófico (Delegido, Tenjo, Ruiz-Verdú, Peña, & Moreno, 2014).

Aunque en este trabajo la clorofila va a ser el parámetro protagonista, hay otros que también tienen su importancia y conviene tener una idea de los órdenes de magnitud de los valores "estándar" de cada uno de ellos:

- Un nivel de clorofila de 2,2 µg/l en el lago Sanabria es bajo (oligotrófico), como se señala en el artículo (Vega, Hoyos, & Aldasoro, 1992), acorde a la clasificación realizada anteriormente.
- El umbral de biovolumen de cianobacterias está establecido en 0.2 mm<sup>3</sup>/l, porque corresponde al primer nivel de alerta del riesgo de cianobacterias (M. Medina-Cobo, 2014).
- Un valor de turbidez menor a 5 NTU le da al agua una apariencia clara. A partir de 55 NTU se empezará a ver nebuloso, y a niveles de 500 NTU ya se verá opaco (Fondriest Environmental, Inc, 2014). La Unidad Nefelométrica de Turbidez, NTU (o *Nephelometric Turbidity Unit*), es la unidad en la que se mide la turbidez.
- Sedimentos suspendidos totales (*TSS*): Concentraciones de sedimentos suspendidos en el agua inferiores a 20 mg/l le dan una apariencia clara, mientras que con niveles superiores a 40 mg/l puede empezar a aparecer turbia.

#### 1.2. Contexto: Los embalses estudiados

Para la realización de este trabajo se estudian los parámetros medidos in-situ de dos embalses a los que se tiene acceso. Estos son los de Cuerda del Pozo, en Soria, y Castro de las Cogotas, en Ávila, ambos en Castilla y León, España.

La razón de contar con medidas in-situ para estos embalses es la participación del grupo de computación avanzada del IFCA en dos proyectos en colaboración con una consultora (Ecohydros-SL): el proyecto europeo FP7 DORII<sup>2</sup> (Deployment of Remote Instrumentation Infrastructure), y el proyecto europeo LIFE+ denominado ROEM+<sup>3</sup> (Gestión Avanzada de la Eutrofización de Aguas Superficiales en Territorio Rural de la Cuenca Hidrográfica del Duero).

En el contexto del proyecto DORII se instaló una plataforma perfiladora en el embalse de Cuerda del Pozo, que permitía recoger medidas en toda la columna de agua. Los valores obtenidos se presentan on-line (*http://doriiie02.ifca.es/*). A esta plataforma virtual también se han transferido los datos medidos en el embalse de Castro de las Cogotas, en donde sólo se dispone de un punto de medida.

En el proyecto ROEM+ se completó la instrumentación con varias boyas distribuidas en el embalse de Cuerda del Pozo, a las que se puede acceder a través de la plataforma on-line (*http://roem.itg.es/*). Las medidas utilizadas serán las que corresponden a las boyas situadas en uno de los tributarios del embalse (ríos que vierten al embalse), Revinuesa, y en la zona denominada Playa Pita.

La Confederación Hidrográfica del Duero (CHD) es el organismo público estatal que está encargado de la gestión de estos embalses.

El visor del ministerio de Medio Ambiente, del cual dependen las Confederaciones Hidrográficas, ofrece información sobre estos embalses (Figura 4).



Figura 4: Recorrido del río Duero desde Soria hasta el límite de España con Portugal. En un recuadro verde se muestra el embalse de Cuerda del Pozo y en rojo el de Castro de las Cogotas. Obtenido de: http://sig.mapama.es/snczi/visor.html?herramienta=Presas

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> http://cordis.europa.eu/project/rcn/86434\_es.html

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> http://www.itg.es/?p=9535

#### 1.2.1. Embalse de Cuerda del Pozo (CdP)

El embalse de Cuerda del Pozo se encuentra entre el sistema Ibérico y el Central, a unos 45 km al noroeste de Soria, en el municipio de Vinuesa. Se sitúa en una zona con gran turismo en verano, rodeado de pinares y a medio camino entre los Parques Naturales Sierra de Cebollera y Cañón del Río Lobos. Regula el río Duero, abastece de agua potable a Soria y a una parte de Valladolid y se usa para regar 26.000 hectáreas (o 260 km<sup>2</sup>) (Confederación Hidrográfica del Duero, s.f.).



Figura 5: Representación gráfica de la situación geográfica del embalse de Cuerda del Pozo. Fuente: http://sig.mapama.es/snczi/visor.html?herramienta=Presas

El también conocido como embalse de La Muedra, que se terminó de construir en 1941, cuenta con una longitud máxima de unos 12 km, una profundidad media de 10 m y una máxima de 36 m (Monteoliva Herreras, 2016). Tiene una capacidad de 248.7 hm<sup>3</sup> (más del 1% del agua embalsada en toda España), aunque en el día de 7 de septiembre del 2017 no llegaba al 30 % de su capacidad (Confederación hidrográfica del Duero, s.f.).



Figura 6: Imagen obtenida mediante el satélite Sentinel-2 del embalse de Cuerda del Pozo el día 19/01/2017.

En la Figura 6 se muestra una imagen obtenida con el satélite Sentinel-2. Para que tuviera una apariencia real se ha tratado utilizando las bandas correspondientes а las longitudes de onda RGB (Red. Green. Blue) del espectro visible.

#### 1.2.2. Embalse de Castro de las Cogotas

Este embalse, concluido en 1994 y cuyo nombre se debe a un castro celta que se encuentra al lado, se extiende a lo largo de unos ocho kilómetros al norte de la ciudad de Ávila. Abastece a varias localidades de Ávila y Valladolid, entre las que se encuentran Olmedo y Medina del Campo. Debido a la cercanía a la capital de provincia, se construyó además otro embalse más pequeño, Fuentes Claras, ligado al primero y justo al lado de la ciudad. Este último tiene como objetivo garantizar el abastecimiento de agua potable a Ávila en situaciones de emergencia, además de ofrecer una zona recreativa en la que se practican algunos deportes.



Figura 8: Imagen obtenida mediante el satélite Sentinel-2 del embalse de Castro de las Cogotas el día 11/7/2017.



Figura 7: Representación gráfica de la situación geográfica del embalse de Castro de las Cogotas. Fuente: http://sig.mapama.es/snczi/visor.html?herramienta=Presas

El embalse, que recoge aguas del río Adaja y proporciona riego a una superficie aproximada de 8.000 hectáreas (80 km<sup>2</sup>), tiene una profundidad máxima de 60 metros y una capacidad de 58,6 hm<sup>3</sup>. Pero al igual que con el embalse de Cuerda del Pozo, actualmente el agua embalsada dista mucho de su volumen máximo, encontrándose el día de 7 de septiembre al 32% de su capacidad (Confederación hidrográfica del Duero, s.f.).

# 2. Los satélites de observación de la Tierra

#### 2.1. Contexto histórico

A partir del primer satélite lanzado al espacio, el Sputnik-1 en 1957, se han seguido desarrollando para diferentes fines. Y con este propósito se puede realizar una clasificación general de los que existen hoy en día: de telecomunicaciones (radio, televisión, telefonía); meteorológicos, utilizados principalmente para registrar el tiempo atmosférico y el clima en la Tierra; de navegación, para sistemas de geolocalización como el GPS, el GLONASS o el Galileo; de reconocimiento, que son satélites de observación o comunicaciones utilizados por servicios militares u organizaciones de inteligencia; astronómicos, para la observación de objetos astronómicos tales como planetas y galaxias; estaciones espaciales, diseñadas para que el ser humano pueda vivir en el espacio exterior; y, finalmente, el tipo de satélites que serán empleados en este trabajo, los de observación terrestre, diseñados principalmente para controlar el medio ambiente, la meteorología o la cartografía. El primero lanzado de esta categoría fue el Landsat-1 en 1972. Desde entonces, otros seis satélites de la serie Landsat (de la NASA) han sido enviados al espacio con sus mejoras en las características de los diferentes instrumentos a bordo. En la Figura 3 se muestra una sucesión cronológica de los satélites de la serie Landsat lanzados al espacio.



Figura 9: Historial de lanzamiento de la serie de satélites Landsat desde Julio de 1972 hasta el último previsto, en el 2020. Fuente: USGS: https://landsat.usgs.gov/landsat-missions-timeline.

Por parte de la ESA, el primer satélite de observación terrestre lanzado fue el ERS-1 en 1991, seguido por el ERS-2 en 1995. Parte de la carga llevada a bordo por ambos incluía un radar de imagen de apertura sintética, un altímetro de radar e instrumentos para medir la temperatura superficial de los océanos y vientos. El conjunto de estos dos satélites pudo enviar colecciones de datos durante 20 años, hasta el 2011.

El sucesor de los ERS fue el satélite Envisat, con una duración de 10 años desde su lanzamiento en el 2002 y 10 instrumentos a bordo. Estos incluían mejoras tanto en los radares de imágenes y de altimetría como en los **radiómetros** de medida de temperatura, ampliando la colección de los datos proporcionados por los satélites predecesores. Además, incluía nuevos instrumentos como un **Espectrómetro** de Imágenes de Resolución Media (el MERIS) sensible a los colores característicos de la tierra y los océanos. Así como los satélites ERS y Envisat, otros han sido los enviados por la ESA, como el Cryosat, el Proba-V o el Swarm, pero los realmente interesantes para este trabajo serán los Sentinel, del programa Copernicus, más concretamente el Sentinel-2 (S-2), junto con el Landsat-8 (L-8).

Sentinel-2 es el nombre que recibe la misión que engloba el conjunto de los dos satélites que adoptan el mismo nombre, el Sentinel-2A, lanzando en junio del 2015, y el Sentinel-2B, en marzo del 2017 (eoPortal, s.f.). El primero será la fuente de imágenes utilizada, que serán las tomadas desde julio del 2015 (un mes después del lanzamiento) hasta febrero del año siguiente.

# 2.2. Características técnicas de los satélites y los instrumentos a bordo

Para poder entender mejor la diferencia entre los diferentes instrumentos mencionados y los que se nombrarán más adelante, se realiza una breve explicación de los mismos:

Existen dos tipos de instrumentos de observación remota: activos y pasivos. Los pasivos detectan la energía natural que es reflejada o emitida desde la escena observada; es decir, la radiación que emite el objeto observado o la que es reflejada por el mismo procedente de una fuente distinta al instrumento, generalmente luz solar (NASA, s.f.). Entre este tipo de dispositivos, utilizados por los satélites de observación terrestre que se utilizarán en este trabajo, se encuentran:

- **Radiómetro**: Mide cuantitativamente la intensidad de la radiación electromagnética de alguna banda del espectro. Normalmente se identifica por la porción del espectro que abarca; visible, infrarroja, microondas...
- **Radiómetro de imagen** (*Imaging Radiometer*): El que incluye una capacidad de escaneo que proporciona una matriz bidimensional de píxeles con las que se puede producir una imagen. Este escaneo puede ser llevado a cabo mecánicamente o electrónicamente usando una determinada selección de detectores.
- Espectrómetro: Está diseñado para detectar, medir y analizar el contenido espectral de la radiación electromagnética incidente. Los espectrómetros de imagen convencionales usan rejillas o prismas para dispersar la radiación y conseguir discriminación espectral.
- El espectrorradiómetro es un radiómetro que puede medir la intensidad de la radiación de múltiples bandas (multiespectral). Las bandas son frecuentemente de alta resolución espectral, diseñadas para la detección remota de parámetros específicos como la temperatura superficial, algunas características de las nubes, el color de los océanos, vegetación, rastros de especies químicas en la atmósfera, etc.

El otro tipo de instrumentos, los activos, proporcionan su propia energía en forma de radiación electromagnética para iluminar el objeto o la escena que observan. Envían un pulso de energía desde el sensor al objeto y luego reciben la radiación que es reflejada o retrodispersada (backscattered) desde el objeto:

- Radar (*Radio Detection and Ranging* detección de radio y oscilación): Usa un transmisor que opera en las frecuencias de microondas o de radio para emitir radiación electromagnética y una antena direccional o receptor para medir el tiempo de llegada de los pulsos de radiación reflejados o retrodispersados desde objetos lejanos. La distancia al objeto se puede hallar sabiendo que la radiación electromagnética viaja a la velocidad de la luz.
- **Escaterómetro** (o *Scatterometer*): Es un radar de microondas de alta frecuencia diseñado específicamente para medir la radiación retrodispersada. Las medidas de este tipo de radiación en la región del espectro de microondas sobre superficies oceánicas se pueden utilizar para obtener mapas de la velocidad y dirección superficial del viento.
- Un Lidar (*Light Detection and Ranging*) usa un láser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) para transmitir un pulso de luz y un receptor con detectores sensibles para medir la luz retrodispersada o reflejada. La distancia al objeto se determina, al igual que con el radar, registrando el tiempo transcurrido entre los pulsos trasmitidos y retrodispersados y usando la velocidad de la luz para calcular la distancia viajada. Los lídares pueden determinar perfiles atmosféricos de aerosoles, nubes y otras discontinuidades de la atmósfera.
- Un **altímetro láser** (o *Laser Altimeter*) usa un lidar para medir la altura de la plataforma del instrumento sobre la superficie. Sabiendo la altura de la plataforma con respecto a la elevación media de la extensión terrestre, la topografía de la superficie que se encuentra por debajo puede ser determinada.

Además, existen varios parámetros que definen las características y la capacidad de medida de los diferentes satélites lanzados al espacio. Son los siguientes (ESA, s.f.):

La **resolución espacial** es la medida del área de la superficie de la Tierra que se representa por un pixel individual. Para el Sentinel-2, existen tres resoluciones espaciales distintas (ver tabla 1).

La **resolución espectral** se puede definir como la medida de la capacidad de distinguir características en el espectro electromagnético.

La **resolución radiométrica** es una medida de la capacidad de un sistema de imagen para grabar diferentes niveles de brillo o tono. Para el Sentinel-2 es de 12-bit, dando un rango de potencial de brillo que va de 0 a 4095.

La **resolución temporal** es la cantidad de tiempo, expresada en días, que transcurre para que un satélite vuelva a pasar por un mismo punto de la superficie de la Tierra. Los satélites Sentinel-2 (formados por los satélites Sentinel-2A y Sentinel-2B) proporcionan un tiempo de revisita de 5 días en el ecuador, siendo de 10 días teniendo en cuenta sólo uno de los dos. En cambio, el del Landsat-7 es de 16 días y el del SPOT-5 de 26.

La **anchura de franja** es la anchura de la superficie terrestre que barre de una vez el instrumento de un satélite para registrar las imágenes de la Tierra. La anchura de franja, o barrido, del Sentinel-2 es de 290 km. Para hacer una comparación, la del Landat-5 TM y la del Landsat-7 ETM+ es de 185 km, y la del SPOT-5 es de 120 km.

Spatial Resolution (m)	Band Number	Central Wavelength (nm)	Bandwidth (nm)
10	2	490	65
	3	560	35
	4	665	30
	8	842	115
20	5	705	15
	6	740	15
	7	783	20
	8a	865	20
	11	1 610	90
	12	2 190	180
60	1	443	20
	9	945	20
	10	1 380	30

Tabla 1: Longitudes de onda (central wavelength (nm)) y anchuras de banda (bandwidth(nm)) de cada resolución espacial (spatial resolution(m)) del instrumento MSI del Sentinel-2. También se muestra el número de banda correspondiente a cada longitud de onda.

#### 2.3. La función de los satélites en la calidad del agua

Como ya se indicó previamente, son varios los parámetros que indican la calidad del agua. Pero no es posible medir todos mediante técnicas de observación remota; hace falta que provoquen un cambio en el color del agua en el espectro de luz visible e infrarroja cercana para que los satélites sean capaces de detectarlos. Algunas de las variables que están definidas en las normas de calidad de agua como directamente adquiribles desde detección remota son el fitoplancton, medida con la concentración de **clorofila-a**; la claridad del agua a partir de la profundidad del disco de Secchi o la turbidez; los sólidos suspendidos no disueltos totales (lo que anteriormente habíamos denominado "materia total suspendida"); la materia orgánica disuelta cromófora, CDOM; y las plantas perjudiciales (macrófitos) (Matthews & Bernard, 2015). Aquí nos concentraremos en la clorofila-a, el pigmento fotosinté tico indicador clave de la biomasa de fitoplancton presente en las masas de agua.

La evaluación de la calidad del agua desde detección remota mediante satélites se restringe a la superficie de agua visible desde el espacio. Hasta ahora, el monitoreo de lagos mediante satélites ha estado muy limitado por la falta de sensores apropiados. Los sensores de color de océanos, como el Espectro-radiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS), a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA, y el Espectrómetro de Imágenes de Resolución Media (MERIS), ya nombrado anteriormente y usado por el Envisat, tenían un periodo frecuente de revisita (de 1 a 3 días) y la suficiente resolución radiométrica (12-bits) necesaria para monitorizar objetos oscuros como masas de agua. Sin embargo, la resolución espacial de estos sensores (de 300 a 1000 metros) sólo era útil para lagos muy grandes, mientras que la

mayor parte de los lagos en la Tierra son pequeños. La anterior serie de satélites Landsat, desde el Landsat-1 hasta el 7, tuvieron una buena resolución espacial (de 30 a 79 metros) pero limitada resolución radiométrica (de 6 a 8 bits), útil sólo para cierto alcance de mapeo de parámetros de calidad de agua en lagos (Toming, y otros, 2016).

La resolución radiométrica del Lansdat-8 es de 12-bits y es útil para detección remota incluso en lagos oscuros. Aunque su periodo de revisita es bastante largo (16 días), lo que limita su uso en la rutina de monitoreo de la calidad de agua en lagos.

El lanzamiento del Instrumento Multiespectral (MSI), explicado en más detalle en la siguiente subsección, a bordo del Sentinel-2 en el 2015, abrió un nuevo potencial en las técnicas de observación remota en lagos. Los datos se adquieren con resolución espacial de 10, 20 y 60 metros, lo que significa que se pueden estudiar incluso pequeños lagos. Se obtienen en 13 bandas espectrales y la resolución radiométrica del sensor es de 12-bits.

#### 2.4. Descripción de los satélites utilizados

Otra característica importante de los satélites que se van a utilizar es su tipo de órbita. Existen dos: Las geoestacionarias y las heliosincrónicas. Mientras que las primeras son muy útiles para los sistemas de GPS, telecomunicaciones y es el usado por los satélites meteorológicos, las segundas son las utilizadas para obtener fotos terrestres de mayor resolución por su cercanía a la tierra y su órbita polar.

Existe una conexión directa entre la distancia que el satélite se encuentra de la Tierra con su velocidad orbital. Cuando esta es de aproximadamente 36.000 km, tarda 24 horas en dar una vuelta completa en torno a la Tierra. Esto significa que, si se encuentra sobre el ecuador, el satélite se encontraría estacionario con respecto a ella. Y esta es la distancia que separa un satélite de órbita geoestacionaria de nuestro planeta.

Pero los utilizados en este trabajo con aquellos con órbita heliosincrónica, que se encuentran siempre en movimiento con respecto a la Tierra. Se necesita que siempre que estos satélites, equipados con instrumentación con sensores pasivos, pasen sobre el mismo punto sobre la Tierra, lo hagan en las mismas condiciones de luz. Los registros deben tener lugar a la misma hora del día para que la altitud del Sol sobre el horizonte sea la misma, y el plano de la órbita del satélite debe permanecer a un ángulo constante a la luz del Sol. Estas condiciones son necesarias para poder comparar imágenes de un mismo lugar en el tiempo, y pueden cumplirse cuando el satélite se sitúa en una órbita polar (ESA, 2014).

#### 2.4.1. Sentinel-2

Uno de los instrumentos más importantes del satélite Sentinel-2 es el MSI (MultiSpectral Instrument) ya nombrado, que incluye 13 bandas espectrales que abarcan del VNIR, visible e infrarrojo cercano (Visible and Near Infrared), al SWIR, infrarrojo de onda corta (Short-Wave Infrared):

El instrumento Multiespectral usa el concepto de "push-broom", del que se basa un tipo de sensor. Este colecciona columnas de datos de imágenes a lo largo de la anchura de franja y utiliza el movimiento de avance de la nave a lo largo del camino de la órbita para proporcionar nuevas filas de adquisición. El periodo promedio de observación sobre áreas de tierra y costas es de aproximadamente 17 minutos.



Figura 10: Representación gráfica del Multispectral Instrument (MSI). A la derecha, una simulación artística del satélite Sentinel-2. Fuente: http://www.esa.int/Our\_Activities/Observing\_the\_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Instrument

La luz reflejada en el instrumento MSI desde la Tierra y su atmósfera se recoge por un telescopio de tres espejos y se enfoca, mediante un divisor de haz (esquematizado en la figura 11), a dos montajes de plano focal (Focal Plane Assemblies, FPAs), mostrados en la figura 12: uno para las diez longitudes de onda VNIR (de las bandas 1 a la 9, contando con la 8a) y el otro para las tres SWIR (las bandas 10, 11 y 12).



Figura 11: Simulación del divisor de haz que equipa el Sentinel-2 para separar la luz visible de la infrarroja. Fuente: http://www.esa.int/Our\_Activities/Observing\_the\_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Instrument

Para lograr la anchura de franja (o barrido) requerida de 290 kilómetros, mayor que en anteriores misiones ópticas multiespectrales (como el SPOT o el LANDSAT), los dos FPAs para las longitudes de onda VNIR y SWIR están compuestos de 12 detectores montados en dos filas horizontales. Se consigue una mayor separación entre las bandas VNIR y SWIR usando filtros rayados que cubren los detectores (ESA, s.f.).



Figura 12: Fotos del montaje del plano focal (FPA) para las bandas VNIR a la izquierda y para las SWIR a la derecha. Créditos de imagen: Airbus DS-F, Sofradir. Imagen obtenida de: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-2

A continuación, en la figura 13, se muestra una gráfica comparativa en la que se observan las longitudes de onda correspondientes a cada número de banda para los satélites Sentine1-2, Landsat 7 y Landsat 8. Esta información será de utilidad para tratar las imágenes de los dos satélites con los que trabajaremos (el S-2 y el L-8).



Figura 13: Comparativa de las bandas de los satélites Sentinel-2 con las de los Landsat 7 y 8. Fuente: USGS

## 3. Datos requeridos y Metodología

El problema planteado en este trabajo puede considerarse un problema de Big Data, ya que se trata de combinar datos que no son sencillos de manejar con las técnicas usuales por su tamaño, complejidad y sobre todo variedad, por requerir la combinación de medidas en dos áreas diferentes.

En efecto, para poder evaluar el interés de las nuevas técnicas de observación remota para medir la calidad del agua en embalses, son necesarios dos tipos de datos diferentes: se trata de comparar los valores reales medidos in-situ en los embalses con los que se podrían obtener con los satélites de observación terrestre equipados con sensores multiespectrales:

- 1. Valores de los parámetros reales obtenidos in-situ en algunas masas de agua. En nuestro caso, provenientes de los dos embalses ya presentados anteriormente, Cuerda del Pozo y Cogotas.
- Imágenes formadas por las bandas espectrales proporcionadas por los satélites. Por sus características y su disponibilidad, se han escogido el Sentinel-2 y el Landsat-8.

#### 3.1. Medidas in-situ en los embalses

Para la monitorización de la calidad de agua en los embalses se han utilizado dos plataformas, una en cada embalse, y varias boyas, todas ellas instrumentadas con diferentes sensores (Monteoliva Herreras, 2016).



Figura 14: Boya de monitorización ubicada en el embalse de Cuerda del Pozo, en Soria.

Las plataformas están situadas en zonas de mayor profundidad de los embalses. Cuentan con diversos sensores y la opción de perfilado en la columna de agua mediante un sistema "wincher", siendo los instrumentos más relevantes:

• Una sonda de precisión CTD, que permite medir conductividad, temperatura y presión (y por tanto la profundidad en la que está situado el sensor).

- Un micro-flu, un fluorímetro miniaturizado y sumergible, que permite estimar mediante técnicas de fluorescencia las concentraciones en el agua de clorofila-a, ficocianinas y materia orgánica disuelta.
- Otros sensores para medir carbonatos, nitratos, carbono orgánico, demanda de oxígeno, etc.

La figura 15 muestra la instrumentación completa instalada en la plataforma.



Figura 15: Esquema de la instrumentación situada en la plataforma de Cuerda del Pozo.

El sistema de transferencia de datos y su almacenamiento en una base de datos remota, situada en el IFCA, se muestra en la figura a continuación (figura 16):



Figura 16: Esquema del sistema de transferencia y almacenamiento de datos de los embalses.

Un esquema similar permite recoger los datos de las boyas, que cuentan con una instrumentación más limitada, pero que incluye fluorímetros y sondas CTD.

La base de datos online tiene un interfaz de acceso directo para los usuarios que

	-		10	and a state of the		-	ROEM
Gestión Avanzada de la Eutrola	zación i	de Aguas Superficiales en Territor		oral de la Cuenca Hidrog			1.1
Subaryunar datur. Lawrenina							
Elementos de interés		Parámetros seleccionados		Seleccione un rango de fe	chas	Agrupa	ción
Boya_Revinuesa		chlorophyllia Boya_Revinuesa n	ġ.			Sepa	rados ·
Propiedades observadas				Desde		Compa	ración
				18/07/2018 20.06		0	
						III.No	mostrar aráficos
Afadritosos	ladir			Hasta			

#### Figura 17: Plataforma on-line de ROEM+.

permite seleccionar el rango y tipo de datos a consultar y/o descargar, y también pueden consultarse los datos directamente a través de los protocolos usuales de acceso.

Las medidas in-situ de los embalses se obtienen, por tanto, a partir de las bases de datos

disponibles on-line anteriormente comentadas. Se adjunta la tabla 2 como ejemplo de algunos de los valores obtenidos con dichas base de datos. En ella se observan

algunos de los parámetros disponibles y la fecha en la que se midieron en el embalse de Cuerda del Pozo. Aparecen valores de la temperatura del agua (T), presión (*P*), la la profundidad (h) a la que se realizó la medida, la cantidad de clorofila-a



Figura 18: Plataforma on-line de DORII.

(Clor-a) presente en ella, el oxígeno disuelto (Dissolved Oxygen, DO), la saturación de oxígeno (Oxysat) y el ph del agua (Ph).

Fecha	<i>T</i> / ºC	P / dbar	<i>h  </i> m	Clor-a / µg/l	DO /mg/l	Oxysat / %	Ph
28/08/2015 10:50	19.095	9.779	9.974	1.758	4.710	50.971	6.801
28/08/2015 10:52	19.403	8.782	8.958	1.758	5.553	60.473	6.928
28/08/2015 10:54	19.637	8.290	8.455	1.709	6.008	65.751	7.017
28/08/2015 10:56	19.914	7.800	7.956	2.149	6.461	71.087	7.204
28/08/2015 10:58	20.301	6.827	6.963	1.905	7.170	79.501	7.417
28/08/2015 11:00	20.458	5.875	5.992	2.393	7.308	81.274	7.513
28/08/2015 11:02	20.492	4.701	4.795	2.247	7.376	82.088	7.554
28/08/2015 11:04	20.519	3.907	3.985	2.491	7.449	82.947	7.587
28/08/2015 11:06	20.530	3.909	3.987	2.344	7.433	82.782	7.627
28/08/2015 11:08	20.575	2.926	2.985	3.468	7.542	84.072	7.689
28/08/2015 11:10	20.637	2.010	2.051	2.442	7.627	85.126	7.716

Tabla 2: Parámetros obtenidos de la base de datos de la plataforma virtual de DORII.

A continuación, se muestran como ejemplo dos gráficas de evolución temporal de la clorofila-a y la temperatura en los meses de noviembre y diciembre para los embalses de Cuerda del Pozo y Castro de las Cogotas (Figs. 19 y 20, respectivamente).

Los datos de la primera gráfica (figura 19) provienen de la boya situada en la confluencia del rio Revinuesa. Es una captura de pantalla de la gráfica proporcionada por la base de datos de ROEM+. La figura 20 es una representación gráfica realizada con Excel con los datos obtenidos de la plataforma virtual de DORII correspondientes a la plataforma instalada en Cogotas.



Figura 19: Progresión temporal de la clorofila-a y la temperatura en el embalse de Cuerda del Pozo medido con la boya Revinuesa.



Figura 20: Progresión temporal de la clorofila-a y la temperatura en el embalse de Castro de las Cogotas

En resumen, las medidas in-situ se obtienen accediendo a la base de datos de las correspondientes plataformas on-line y descargando los datos del periodo seleccionado. Estos tienen una periodicidad horaria, lo que nos permite contar con miles de datos de la calidad del agua a lo largo del año en los dos embalses considerados.

#### 3.2. Datos proporcionados por los satélites

Algunas de las misiones espaciales ya mencionadas proporcionan imágenes ópticas de alta resolución para monitorizar la superficie de la Tierra. El satélite Sentinel-2, equipado con sensores multiespectrales (MSI), obtiene la reflectancia de la tierra en un amplio rango de longitudes de onda cuantificadas en bandas espectrales (con sus correspondientes anchuras). Estas ayudan considerablemente a la identificación y cuantificación de diferentes áreas de la superficie terrestre.

Los productos disponibles para los usuarios se pueden dividir en dos categorías que se muestran resumidas en la siguiente tabla (tabla 3):

Name	High-level Description	Production & Distribution	Data Volume
Level-1C	Top-of-atmosphere reflectances in cartographic geometry	Systematic generation and on- line distribution	500 MB (each 100x100km <sup>2</sup> )
Level-2A	Bottom-of-atmosphere reflectances in cartographic geometry (prototype product)	Generation on user side (using Sentinel-2 Toolbox)	600 MB (each 100x100km <sup>2</sup> )

Tabla 3: Tipos de productos proporcionados a los usuarios por el satélite Sentinel-2. Fuente: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/data-products.

Los productos del nivel-2A son imágenes a las que se les ha aplicado una corrección atmosférica con el procesador Sen2cor especialmente diseñado para ello. El Sen2cor, proporcionado por la ESA, está disponible de forma gratuita y un usuario podría descargarse imágenes del nivel 1C y poder transformarlas al nivel 2A.

Tanto para el nivel-1C como para el nivel-2A, el grid, también llamados azulejos, en el que se divide la superficie terrestre, son orto-imágenes<sup>4</sup> de 100 km<sup>2</sup> en proyección UTM/WGS84. El sistema UTM (*Universal Transverse Mercator*) divide la superficie de la Tierra en 60 zonas. Cada zona UTM tiene una anchura de 6° de longitud y 8° de latitud. Los azulejos son de aproximadamente 500MB de tamaño.

En la actualidad aún son pocos los softwares que tienen en su plataforma los códigos y los algoritmos necesarios para el procesamiento de estas imágenes, pero la ESA ha proporcionado una herramienta propia para la gestión de esta información, SNAP.

A continuación, se muestran imágenes ópticas tratadas con SNAP para el embalse de Cuerda del Pozo como muestra de los datos tratados a lo largo del proyecto.



Figura 21: Imagen RGB obtenida con las bandas equivalentes a las longitudes de onda del espectro visible correspondientes a los colores rojo, verde y azul. Tomada el día 28/8/2015.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Una orto-imagen es una imagen de gran precisión, como las obtenidas mediante satélite.

Las siguientes dos imágenes fueron tratadas según una guía especialmente elaborada y proporcionada por la ESA para obtener mapas de turbidez y clorofila a través del programa SNAP.



Figura 22: Imagen tratada para que se aprecie la turbidez presente en el embalse. Tomada el día 29/7/2015.

En la figura 22 se observa una mayor turbidez en los bordes del embalse. En cambio, en la figura 23, que muestra las diferencias de clorofila presentes, la zona del parámetro predominante es la central. En esta figura el pigmento de clorofila-a viene representado por el color más anaranjado.



Figura 193: Imagen tratada para resaltar los pigmentos de clorofila-a predominantes en el fitoplancton. Tomada el día 29/7/2015.

#### 3.3. Metodología de comparación de datos

El objetivo principal del trabajo es comprobar que la calidad del agua presente en embalses o lagos en general puede ser determinada mediante observación remota, y revisar las herramientas y procesos necesarios para ello. Aunque se ha presentado en un apartado anterior cómo acceder a las imágenes de los satélites, y obtener estimaciones iniciales de los parámetros buscados, se pretende comprobar que estas estimaciones son realistas, o al menos proporcionan una base inicial para estudios más detallados.

Por ello, se propone comparar los valores de clorofila, parámetro característico en esta evaluación, que se pueden obtener mediante técnicas de observación remota, con los datos medidos in-situ en cada embalse. Para ello es necesario que ambos conjuntos de datos coincidan en el tiempo.

El primer paso fue seleccionar las imágenes proporcionadas por los satélites para quedarnos con aquellas libres de nubes. Después se comprobó qué días correspondían a esas imágenes y si se disponía de las medidas in-situ realizadas en los embalses en las mismas fechas. Hay que tener en cuenta que el satélite Sentinel-2 se puso en operación solamente en fechas recientes y que no se disponía de medidas in-situ todos los días.

Al principio se utilizaron las imágenes proporcionadas por la ESA en la página <u>https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home</u>. Pero tardaban mucho tiempo en descargar y para comprobar si estaban nubladas o no hacía falta cargarlas en otro programa, lo que lo convertía en un proceso largo. Se trataron algunas de esas imágenes mediante el mismo programa, el SNAP, diseñado especialmente por la ESA para manejarlas. Para ello se utilizó una guía proporcionada por la misma Agencia en la que se explicaban los pasos a llevar a cabo para obtener mapas de turbidez o clorofila en una determinada masa de agua.

Sin embargo, este procedimiento tenía varios inconvenientes: primero, el tiempo de descarga de las imágenes era muy grande (una o dos horas por cada una); además, el programa SNAP también requería demasiado tiempo para realizar los tratamientos necesarios a cada imagen; y, por último, el programa sólo admitía las imágenes adquiridas por la página web.



Figura 204: Captura de pantalla del programa SNAP proporcionado por la ESA.

Por todo ello se optó por llevar a cabo otra metodología para obtener los valores necesarios de las imágenes tomadas por los satélites. Con Google Earth Engine se podían adquirir las bandas de las imágenes en mucho menos tiempo, tanto del Sentinel-2 como del Landsat-8. Así que el siguiente procedimiento, aunque fuesen necesarias más herramientas, fue más rápido y eficaz:

- Se escribió el código necesario en Google Earth Engine para descargar los archivos deseados. Había que elegir el satélite del que quisiéramos obtenerlos, el día en que se tomó la imagen, las bandas y las coordenadas del embalse elegido para cada día (un ejemplo del Código escrito se incluye en el apéndice). El archivo descargado era una carpeta comprimida en formato ZIP que contenía varios ficheros que correspondían a cada una de las diferentes bandas descargadas.
- 2) Después fue necesario cambiar al formato de esos ficheros para poder abrirlos con Python. Para ello se utilizó el programa QGIS (Figura 25), con el que se procedió a cambiarlos de un formato *.tif* a uno *.nc* (netCDF).
- 3) Finalmente se escribieron con Python los códigos con los que se pudieron obtener los valores de las bandas seleccionadas (uno de los utilizados se muestra en el apéndice) y aplicar los modelos que las relacionasen.



Figura 215: Captura de pantalla del programa QGIS.

# 3.4. Estimación del nivel de clorofila a partir de las imágenes multi-espectrales de satélites

Debido a la gran importancia y a lo que implicaría poder monitorizar la calidad del agua mediante técnicas de observación remota, ya son varios los artículos que describen algunos modelos que relacionan diferentes bandas espectrales proporcionadas por los satélites Sentinel-2 y Landsat-8 (entre otros) que ya han sido probados en otros embalses y los resultados que se obtienen. Para estudiar los embalses de Soria y de Ávila, se han tomado como referencias principales dos artículos de los que se han seleccionado dos modelos para poder realizar una comparación. Aquellos en los que nos hemos basado se detallan a continuación.

El primer estimador considerado es el siguiente:

• EC1 = B5  $-\frac{B4+B6}{2}$  (Toming, y otros, 2016)

Esta expresión, que relaciona las bandas 4, 5 y 6, es la que puede resultarnos más intuitiva, ya que, en realidad, lo que se realiza con ella es tomar el valor del pico de reflectividad más alto de la clorofila, ya mostrado anteriormente, y restarle los valores de fondo.

El segundo estimador considerado es:

• EC2 =  $\frac{B5}{B2}$  (Delegido, Tenjo, Ruiz-Verdú, Peña, & Moreno, 2014)

En el artículo citado se realiza un estudio en el que se comparan varias relaciones entre las diferentes bandas del SENTINEL-2 que se podrían utilizar para obtener a través de ellas valores de clorofila. En él se concluye que la relación entre las bandas 5 y 2 es la más adecuada para la obtención de dicho parámetro.

## 4. Resultados y análisis

# 4.1. Medidas de clorofila en el embalse de Cuerda del Pozo

En primer lugar, se ha querido comprobar si en los periodos en los que había mayor eutrofización esto ocurría simultáneamente en las diferentes coordenadas en las que se situaban los tres puntos de medida del embalse. Se muestra en la Figura 26 una progresión temporal de la clorofila durante los meses de noviembre y diciembre del 2015 para las tres boyas en el embalse de Cuerda del Pozo. En la plataforma principal se han multiplicado por 5 los valores para apreciar mejor la evolución del parámetro, pues sus valores son siempre más bajos. Las discontinuidades presentes en algunos días en diciembre en esta plataforma corresponden a la ausencia de datos en estas fechas, debido a problemas de suministro de energía.



Figura 226: Progresión temporal de los niveles de clorofila en el embalse de Cuerda del Pozo para las tres coordenadas en las que se tomaron medidas.

La figura permite observar como los tres puntos de medida coinciden en que en el periodo inicial hubo una mayor eutrofización en todo el embalse, aun teniendo en cuenta que los valores de la plataforma principal son mucho menores. Mientras que las boyas de Playa Pita y Revinuesa están situadas en regiones con menor profundidad, esta es mucho mayor en la zona en la que se encuentra la plataforma principal. Seguramente sea esta la explicación de que la eutrofización tenga menor presencia en esta última. De la figura también se puede apreciar cómo el fenómeno de eutrofización es claramente local, por lo que debe tenerse en cuenta la resolución espacial a la hora de comparar las medidas desde satélites.

#### 4.2. Espectro de reflectancia medido desde satélites

A continuación, se muestran varios espectros de reflectancia correspondientes a las coordenadas de las plataformas o boyas situadas en los embalses de Cuerda del Pozo y Castro de las Cogotas para dos días diferentes, en los que se dispone de imágenes de los satélites, para analizar la presencia de clorofila. En total, cuatro espectros: dos días diferentes para una coordenada en cada embalse.

Las dos primeras gráficas, mostradas en las figuras 27 y 28, corresponden a los espectros de reflectancia de la boya de Playa Pita para los días 28 de agosto del 2015 y 4 de febrero del 2016, respectivamente. A la hora de tomar los valores de las bandas, se seleccionaron las coordenadas, indicadas en las figuras, que correspondían a la posición en la que se encontraba la boya.



Figura 237: Espectro de reflectancia en la coordenada 41°51'19''N, 2°46'54''W situada en el embalse de Cuerda del Pozo (boya de Playa Pita). Valores procedentes de una imagen tomada por Sentinel-2 el día 28/8/2015.

El valor "real", medido in-situ, de clorofila correspondiente al día 28 de agosto del 2015 era de 5.78  $\mu$ g/l. y el del día 4 de febrero del 2016 fue de 10  $\mu$ g/l.



Figura 248: Espectro de reflectancia en la coordenada 41°51'19''N, 2°46'54''W situada en el embalse de Cuerda del Pozo (boya de Playa Pita). Valores procedentes de una imagen tomada por Sentinel-2 el día 4/2/2016.

Los valores de la reflectividad, mostrados en el eje de ordenadas de las gráficas, están directamente relacionados con las características de la instrumentación o los sensores implicados en la toma de imágenes. Y es que aquí entra en juego la *resolución radiométrica* del satélite utilizado, porque como ya se explicó anteriormente, es la encargada de diferenciar, en un sistema de imagen, los diferentes niveles de brillo o tono que existen. La del Sentinel-2, el satélite que nos suministró las imágenes en este caso, es de 12-bit, lo que implica que tiene un rango de potencial de brillo con valores que van de 0 a 4095.

Para interpretar estos espectros y poder determinar la presencia de clorofila en cada una de las coordenadas, hace falta comparar con el espectro de reflectancia de la clorofila, ya mostrado anteriormente (Figura 3), que, para poder realizar más fácilmente la comparación, se vuelve a mostrar a continuación (Figura 29).



*Figura 259: Espectro de reflectancia de una superficie de agua eutrofizada.* 

Las dos gráficas siguientes (figuras 30 y 31), correspondientes a los espectros observados en dos días diferentes en las coordenadas de la plataforma del embalse de Cogotas, muestran la presencia de un débil pico en la longitud de onda esperada.



Figura 30: Espectro de reflectancia en la coordenada 40°43'17.5''N, 4°41'53''W situada en el embalse de Cogotas. Valores procedentes de una imagen tomada por Sentinel-2 el día 18/1/2016.



Figura 31: Espectro de reflectancia en la coordenada 40°43'17.5''N, 4°41'53''W situada en el embalse de Cogotas. Valores procedentes de una imagen tomada por Sentinel-2 el día 29/11/2015.

Debe tenerse en cuenta que los valores de clorofila medidos in-situ en la plataforma de Cogotas fueron mucho mayores que los de Cuerda del Pozo: para el día 18 de enero del 2016 de 34.55  $\mu$ g/l, y para el 29 de noviembre de 2015, de 46.02  $\mu$ g/l.

Como se puede observar, en el embalse de Castro de las Cogotas se aprecia un pico de reflectividad en la longitud de onda correspondiente a 700 nm en ambos días, mientras que en Cuerda del Pozo no aparece. La gráfica siguiente, que superpone el espectro de reflectividad de un lago eutrofizado, con el de Castro de las Cogotas del día 18 de enero del 2016, muestra más claramente este hecho.



Figura 32: Superposición del espectro de reflectancia de un lago eutrofizado (con alta cantidad de clorofila-a) con el del embalse de Castro de las Cogotas, con un valor de clorofila correspondiente a 35 μg/l.

Los espectros obtenidos son compatibles con el hecho de que en el embalse de Castro de las Cogotas los valores de clorofila se encuentran a 35 y 46 µg/litro, mientras que en el de Cuerda del pozo son mucho menores (6 y 10 µg/litro), apreciándose el pico solo para los valores por encima de un cierto valor. De hecho,

comparando los dos espectros del embalse de Soria detenidamente en la zona de  $\lambda =$  700 nm, uno podría apreciar una pequeña desviación de lo que sería una línea recta para el día correspondiente a una medida in-situ de clorofila de 10 µg/litro que no aparece para el otro día de menor valor.

## 4.3. Correspondencia entre medidas tomadas in situ y valores estimados mediante satélite

Continuando el análisis anterior, hemos aplicado a un conjunto mayor de imágenes disponibles en los dos embalses, la estimación más intuitiva de la concentración de clorofila a partir de los valores de las bandas en el espectro de reflectancia:

$$\mathrm{EC1} = \mathrm{B5} - \frac{\mathrm{B4} + \mathrm{B6}}{2}$$

para poder comparar directamente la correlación con el valor medido in-situ de la clorofila. Los resultados se muestran en la siguiente figura (figura 33).



Figura 3326: Comparación de los valores obtenidos mediante la relación de bandas dada por el estimador EC1 con los obtenidos in-situ en ambos embalses.

Los valores de la derecha, más altos, corresponden a los obtenidos en el embalse de Castro de las Cogotas, como vimos en los espectros de reflectancia anteriores. Los de la izquierda provienen del embalse de Cuerda del Pozo, más concretamente de la boya de Revinuesa.

#### 4.4. Análisis

La figura 33 resume tanto el potencial de la técnica como sus limitaciones. En primer lugar, se observa una correlación muy clara entre las medidas obtenidas a partir de las imágenes del satélite, mediante el estimador EC1, con las medidas obtenidas in-situ. Esta correlación permite ser muy optimista en cuanto al uso de esta técnica para detectar procesos de eutrofización en masas de agua.

La ausencia de datos en la zona intermedia denota la dificultad de contar a la vez con medidas in-situ en ese rango intermedio y con medidas de imágenes de satélites, sin problemas de cobertura nubosa, que permitan cubrir todo el rango y realizar una mejor validación, o incluso calibración, del método.

La pobre correlación para valores bajos de la concentración medida de clorofila, indica por un lado una posible escasa sensibilidad del método y por otro la posible necesidad de una validación o incluso una re-calibración adicional de las medidas insitu.

Adicionalmente se realizó el mismo procedimiento que con la EC1 para la EC2. Se elaboró una nueva gráfica de correlación entre las medidas in-situ y las observaciones del satélite, utilizando en este caso el estimador EC2 (figura 34). Como puede observarse, el coeficiente de correlación obtenido es muy inferior.



Figura 34: Comparación de los valores obtenidos mediante la relación de bandas dada por el estimador EC2 con los obtenidos in-situ en ambos embalses.

#### 4.5. Posibles medidas de mejora y trabajo adicional

El trabajo realizado ha requerido un gran esfuerzo, en primer lugar, de documentación sobre el tema y comprensión de los aspectos básicos, y, en segundo lugar, de implementación o adaptación y uso de las herramientas informáticas necesarias. Por ello queda mucho trabajo por realizar y muchas mejoras, planteadas inicialmente en el proyecto, que no se han podido estudiar por falta de tiempo, y que quedan pendientes para futuros proyectos.

Una de las más importantes es el tratamiento de las correcciones a realizar sobre las imágenes de los satélites teniendo en cuenta las condiciones de la atmósfera, con una correlación muy importante a su vez con los factores climáticos, que son clave en los procesos de eutrofización. Aunque Sentinel-2 incluye una herramienta de correcciones denominado *Sen2cor*, este no ha sido diseñado para masas de agua. Validar o no su funcionamiento sería muy interesante (Toming, y otros, 2016).

El análisis de mejores métodos para estimar la presencia de clorofila a partir del espectro completo y no solamente de tres bandas, y tener en cuenta calibración local de las imágenes, es otro factor a tener en cuenta, y solo parcialmente abordado a la hora de definir los mapas desde aplicaciones como Google Earth.

Además, otro problema existente en la actualidad es la escasez de satélites que proporcionan medidas sobre la Tierra con las características necesarias para poder monitorizar adecuadamente las masas de agua de manera continuada, o el insuficiente tiempo de revisita de los disponibles. Pero se espera que, en un futuro, cuando se vayan extendiendo estas técnicas de observación remota y se puedan aplicar como técnica habitual, el número de satélites de observación terrestre aumente.

La selección de un conjunto mejor de medidas in-situ es otro problema importante. Se cuenta con algunas medidas analíticas (de laboratorio) de referencia, pero no ha sido posible incluir un análisis detallado que permita mejorar la confianza en las medidas utilizadas.

Por último, el desplazamiento de las plataformas desde los embalses en los que se encontraban a otros nuevos embalses para nuevos proyectos no ha hecho posible la revisión in-situ prevista este verano, con medidas adicionales.

## 5. Conclusiones

Se ha realizado un estudio sobre la posibilidad de utilizar imágenes multiespectra les proporcionadas por la última generación de satélites de observación de la tierra de la ESA, los Sentinel, para detectar procesos de eutrofización de masas de agua, mediante la medida indirecta de la concentración de clorofila.

Se ha efectuado un estudio de las herramientas necesarias para obtener dichas imágenes, y como procesar las mismas.

Se ha accedido a las medidas in-situ en diferentes embalses de la cuenca del Duero, con diferentes niveles de eutrofización, y por tanto diferentes concentraciones de clorofila. Con estos valores se ha podido comprobar las discontinuidades de los niveles de clorofila existentes en un mismo embalse.

Se han comparado las medidas obtenidas a partir de las imágenes de satélites mediante un estimador sencillo, basado en los valores del espectro de reflectancia, y en particular en la relación entre bandas significativas, con los valores de clorofila medidos in-situ.

Analizando los valores para varias observaciones en dos embalses diferentes, uno con un nivel de clorofila elevado y otro con un nivel de clorofila bajo, se observa una clara correlación, con un coeficiente superior a 0,8, que permite ser optimista respecto a la aplicación del método en el futuro.

Se sugiere para el futuro la integración de correcciones adicionales, la comparación con otros estimadores que puedan mejorar la correlación de las estimaciones basadas en imágenes de satélites con las medidas in-situ, y sobre todo el contraste con un mayor número de estas medidas in-situ.

Por último, se quiere resaltar la importancia del monitoreo de los parámetros de los embalses y la importancia de las medidas de vigilancia de la calidad del agua con estas técnicas de observación remota. Si estas técnicas pudieran aplicarse en un fututo, se podrían monitorizar incluso masas de agua a las que no se tiene acceso. Podrían aplicarse a los embalses más cercanos para luego, idealmente, extenderlas a cualquier zona del mundo.

Además, me gustaría indicar que gracias a este trabajo he mejorado mi formación:

- Aprendiendo cómo se manejan datos y qué herramientas se utilizan para analizarlos.
- Seleccionando sólo aquello importante frente a lo menos relevante entre la inmensa cantidad de información existente. Sobre este punto y el anterior ya había aprendido durante el grado, pero, en cuanto a este último, no con tanto volumen de información.
- Entendiendo el trabajo que se realiza en centros como el IFCA en este campo.
- Conociendo las diferentes misiones realizadas por la ESA y la NASA para desarrollar nuevas técnicas de observación remota, particularmente en masas de agua.

- Revisando la instrumentación que está a bordo de los diferentes satélites utilizados, principalmente en el Sentinel-2, con el MSI.
- Manejando nuevas herramientas informáticas que desconocía, como Google Earth Engine, QGIS o el programa SNAP suministrado por la ESA.
- Mejorando las habilidades de programación con el lenguaje Python.
- Aprendiendo sobre los parámetros que miden la calidad del agua.
- Aplicando y recordando conocimientos básicos estudiados en la carrera, como la diferencia entre reflectividad y reflectancia, o la relación entre las longitudes de onda absorbidas y reflejadas.

Se puede concluir que estos nuevos métodos, que resultan de un gran interés en numerosos aspectos, están teniendo una buena evolución con interesantes resultados que en un futuro podrían ser de una gran utilidad. Aun así, queda demostrado que aún falta mucho trabajo que realizar.

# 6. Bibliografía

- Ali, K., Witter, D., & Ortiz, J. (2014). Application of empirical and semi-analytical algorithms to MERIS data for estimating chlorophylla in Case 2 waters of Lake Erie. *Environmental Earth Sciences*(71), 4209-4220. doi:10.1007/s12665-013-2814-0
- Chislock, M. F., Doster, E., Zitomer, R. A., & Wilson, A. E. (2013). *The Nature Education*. Obtenido de https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/eutrophicationcauses-consequences-and-controls-in-aquatic-102364466
- Confederación hidrográfica del Duero. (s.f.). *Portal de la Confederación Hidrográfica del Duero*. Recuperado el 6 de Septiembre de 2017, de http://www.chduero.es/Default.aspx?tabid=257&p=Soria
- Confederación Hidrográfica del Duero. (s.f.). *Portal de la Confederación Hidrográfica del Duero*. Recuperado el 17 de Agosto de 2017, de http://www.chduero.es/tabid/229/Default.aspx
- Delegido, J., Tenjo, C., Ruiz-Verdú, A., Peña, R., & Moreno, J. (2014). Modelo empírico para la determinación de clorofila-a en aguas continentales a partir de los futuros Sentinel-2 y
   3. Validación con imágenes HICO. *Revista de Teledetección*(41), 37-47.
- eoPortal. (s.f.). *eoPortal Directory*. (H. J. Kramer, Editor) Recuperado el Agosto-Septiembre de 2017, de Sharing Earth Observation Resources: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicussentinel-2
- ESA. (2014). *ESA Eduspace*. Recuperado el Septiembre de 2017, de http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\_ES/SEMXM3E3GXF\_0.html#a
- ESA. (s.f.). *Sentinel Online*. Recuperado el Agosto de 2017, de https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload/
- Fondriest Environmental, Inc. (Junio de 2014). *Fundamentals of Environmental Measurements*. Recuperado el 19 de Julio de 2017, de Turbidity, Total Suspended Solids and Water Clarity.: http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/waterquality/turbidity-total-suspended-solids-water-clarity/
- Gholizadeh, M. H., Melesse, A. M., & Reddi, L. (2016). A Comprehensive Review on Water Quality Parameters Estimation Using Remote Sensing Techniques. (H. Tommervik, Ed.) *Sensors*, 43. doi:10.3390/s16081298
- Hoyos, C. d., Negro, A. I., & Aldasoro, J. J. (2004). Cyanobacteria distribution and abundance in the Spanish water reservoirs during thermal stratification. *Asociación Española de Limnología*, 119-132.
- L. Carvalho, S. P.-T. (2012). Strength and uncertainty of phytoplankton metrics for assessing eutrophication impacts in lakes. Dordrecht, Países Bajos: Springer Science+Business Media.

- M. Medina-Cobo, J. D. (2014). Estimation of cyanobacteria biovolume in water reservoirs by MERIS sensor. *Water Research*, 10-20.
- Matthews, M. W., & Bernard, S. (2015). Eutrophication and cyanobacteria in South Africa's standing water bodies: A view from space. *South African Journal of Science, 111*(5/6), 8. Obtenido de http://dx.doi.org/10.17159/sajs.2015/20140193
- Monteoliva Herreras, A. P. (2016). Aproximación basada en ciberinfraestructuras remotas y modelado para mejorar la gestión de la eutrofización en lagos y embalses. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Santander. Obtenido de https://grid.ifca.es/wiki/ModellingWaterReservoirs?action=AttachFile&do=view&targe t=tesis-monteoliva.pdf
- NASA. (s.f.). *Earth Observatory*. Recuperado el 3 de Septiembre de 2017, de https://earthobservatory.nasa.gov/Features/RemoteSensing/remote\_08.php
- Olmo, M., & Nave, R. (s.f.). *Hyperphysics*. Recuperado el 18 de Julio de 2017, de http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Biology/pigpho.html
- Toming, K., Kutser, T., Laas, A., Sepp, M., Paavel, B., & Nõges, T. (2016). First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery. *Remote sensing*.
- UNEP GEMS Water Programme with UNESCO. (2008). Water Quality for Ecosystems and Human Health. Burlington, Ontario, Canadá.
- Vega, J. C., Hoyos, C. d., & Aldasoro, J. J. (1992). The Sanabria lake. The largest natural freshwater lake in Spain. *Asociación Española de Limnología*, 49-57.

# 7. Apéndices

## 7.1. Glosario

- <sup>1)</sup> La **producción primaria** es la llevada a cabo por los organismos autótrofos<sup>5</sup> en la que fabrican materia orgánica.
- <sup>2)</sup> Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Medida que se obtiene mediante la determinación de la cantidad de oxígeno presente en una masa de agua. Este parámetro informa de la cantidad de oxígeno que algunos microorganismos, principalmente bacterias, hongos o plancton, consumen durante la degradación de sustancias orgánicas contenidas en una muestra líquida. Se expresa en mg/l. Fuente: wiki y http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/DBO.htm.
- <sup>3)</sup> Las cianobacterias, también llamadas algas verde-azules (*green-blue algae*) son un grupo de organismos procariotas fotosintéticos que puede producir "blooms" o proliferaciones, conocidos como CHABs (Cyanobacteriae Harmful Algae Blooms).
- <sup>4)</sup> La clorofila es un pigmento verde que el fitoplancton usa para absorber luz solar y transformarla en energía útil empleada en la fotosíntesis. Este pigmento está presente en las cianobacterias y en aquellos organismos que contienen plastos<sup>6</sup>.
- <sup>5)</sup> El **fitoplancton** es el conjunto de algas microscópicas y otros organismos vegetales que viven en la parte superior de masas de agua (océanos, lagos...) donde son alcanzados por la luz.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Los organismos autótrofos son aquellos capaces de producir su propio alimento a partir de materia inorgánica utilizando como fuente de energía la luz solar o algunas sustancias químicas. Las plantas son organismos autótrofos.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Plasto: Orgánulo responsable de la producción y el almacenamiento de compuestos químicos, muy importante en el proceso de la fotos íntesis, entre otros.

#### 7.2. Códigos utilizados

A continuación, se adjuntan algunos de los códigos utilizados, tanto para Python como para Google Earth Engine.

#### 7.2.1. Python

```
from netCDF4 import Dataset
import numpy as np
#Abro el archivo de clorofila
fhB4 = Dataset ('C:\\Users\\S-
2\\25012016Final\\38c99a381cb0551a49fd689db70024c5.B4.nc', mode='r')
fhB5 = Dataset ('C:\\Users\\S-
2\\25012016Final\\38c99a381cb0551a49fd689db70024c5.B5.nc', mode='r')
fhB6 = Dataset ('C:\\Users\\S-
2\\25012016Final\\38c99a381cb0551a49fd689db70024c5.B6.nc', mode='r')
# Busco dentro de la variable fh (en la que hay todo el archivo)
# Vector de longitudes
lons = fhB4.variables['lon'][:]
# Vector de latitudes
lats = fhB4.variables['lat'][:]
# Variable valor de la banda creada con la formula
band4 = fhB4.variables['Band1'][:].data[:]
band5 = fhB5.variables['Band1'][:].data[:]
band6 = fhB6.variables['Band1'][:].data[:]
# Datos de latitud y longitud a buscar (Playa pita, Revinuesa, Doriiie)
latPP = 41.85402
lonPP = -2.78302
latR = 41.8994
lonR = -2.7407
latD = 41.87256
lonD = -2.70572
# Busca las variables de latitud y longitud en los vectores y cuando coincide
# devuelve el valor de la banda
for i in range(len(lats)):
  if np.abs((fhB4.variables['lat'][i])-latPP)<0.00005:
    for j in range(len(lons)):
```

```
if np.abs((fhB4.variables['lon'][j])-lonPP)<0.00005:
    print ("longitude:", i)
    print ("latitude:", j)
    print ("value of B4:", fhB4.variables['Band1'][i,j])
    print ("value of B5:", fhB5.variables['Band1'][i,j])
    print ("value of B6:", fhB6.variables['Band1'][i,j])
```

#### 7.2.2. Google Earth Engine

//Obtenemos una imagen del embalse de Cuerda del Pozo (CdP) con el satélite S-2 y los valores de las bandas seleccionadas

//Select the geometry and the coordinates that we want var embalseCdP = ee.Geometry.Polygon([[[-2.830,41.917],[-2.830,41.821],[-2.684,41.821],[-2.686,41.916],[-2.830,41.917]]]);

//Images collection of S2 with diferent filters. Bounds(Coordinates), Date
var S2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2').filterBounds(embalseCdP).filterDate('
2016-01-30', '2016-02-10')

//Create image of a mosaic
var imageS2=S2.mosaic();

var file = imageS2.select(['B1', 'B2', 'B3', 'B4', 'B5', 'B6', 'B7', 'B8', 'B8A', 'B9', 'B10', 'B11', 'B12']);

```
var path = file.getDownloadURL({
    'scale': 10,
    'region': '[[-2.830,41.917],[-2.830,41.821],[-2.684,41.821],[-2.686,41.916],[-
2.830,41.917]]'
});
```

print(path);