Universidad Zaragoza
1542

Trabajo Fin de Grado

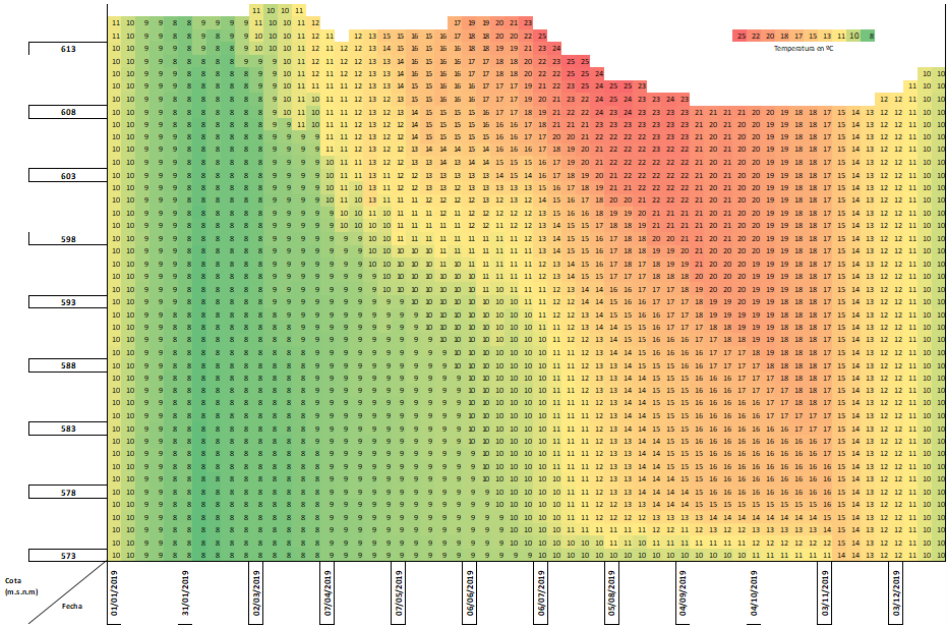
Caracterización térmica y físico-química de las aguas del embalse de Los Fayos (Zaragoza)

Autor

Guillermo Pérez Villar

Director

José Ángel Sánchez Navarro



Facultad de Ciencias

2020/2021

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaria agradecer el interés y esfuerzo mostrado por parte de mi director. También quiero agradecer la colaboración de Daniel Peña, inseparable compañero en las jornadas de campo; sin olvidar la ayuda e interés de ampliar los datos de campo brindados por Miguel Bartolomé.

ÍNDICE

RESUMEN Y ABSTRACT..... 1
1. INTRODUCCIÓN..... 2
2. OBJETIVOS..... 3
3. CONTEXTO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO 3
3.1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA..... 3
3.2. CONTEXTO GEOLÓGICO..... 4
3.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EMBALSE..... 5
4. MATERIAL Y MÉTODOS..... 7
4.1. OBTENCIÓN DE DATOS..... 7
4.2. TRATAMIENTO DE DATOS 8
5. RESULTADOS..... 9
5.1 RÉGIMEN HIDROLÓGICO DEL EMBALSE..... 9
5.2 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS ESTACIONALES..... 10
5.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS ESTACIONALES 11
5.4. CAMBIOS DIARIOS..... 13
6. DISCUSIÓN..... 13
6.1. RÉGIMEN HIDROLÓGICO..... 13
6.2. CARACTERIZACIÓN TÉRMICA ESTACIONAL..... 14
6.2.1. Temperatura en profundidad..... 14
6.2.2. Caracterización de la termoclina..... 16
6.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA..... 19
6.3.1 Clorofila “a”..... 19
6.3.2 Oxígeno disuelto..... 20
6.4. CARACTERIZACIÓN DIARIA..... 21
7. CONCLUSIONS..... 22
8. BIBLIOGRAFÍA..... 24

ANEXO I
ANEXO II

ABSTRACT

A characterisation of the thermal and other physicochemical parameters (temperature, pH values, redox potential, conductivity, turbidity, chlorophyll, dissolved oxygen) of the waters of "El Val" reservoir (Zaragoza) is presented. The data analysed come from a continuous measurement probe (Aquadam) that records these parameters along the water column up to 573 m above sea level in the reservoir; the profiles are carried out every 6 hours throughout the year. All the data was provided by the Confederación Hidrográfica del Ebro.

With all the data, a selection has been made with specific cadences for the different objectives of the work, and they have been represented in tables and graphs that make their interpretation easier.

In relation with the temperature, there are two thermoclines; the shallower one is mainly linked to thermal flow by conduction, which progressively deepens until it disappears due to the homogenisation of the water column; the deeper one, of hydrodynamic origin, remains stable.

The physico-chemical parameters show a seasonal and depth evolution; they also show correlations with each other, and with the environmental and hydrological conditions of the reservoir.

Palabras clave: embalse, caracterización, físico-química, termoclina.

RESUMEN

Se presenta una caracterización tanto térmica como de otros parámetros físico-químicos (temperatura, valores de pH, potencial redox, conductividad, turbidez, clorofila, oxígeno disuelto) de las aguas del embalse de “El Val” (Zaragoza). Los datos analizados proceden de una sonda de medición continua (Aquadam) que registra estos parámetros a lo largo de la columna de agua hasta la cota 573 m.s.n.m en el embalse; los perfiles se realizan cada 6 horas a lo largo de todo el año. El conjunto de los datos ha sido facilitado por la Confederación Hidrográfica del Ebro.

Con el conjunto de los datos, se ha hecho una selección con cadencias específicas para los distintos objetivos del trabajo, y se han representado en tablas y gráficos que facilitan la interpretación de los mismos.

En relación con la temperatura se muestra la existencia de dos termoclinas; la más somera ligada principalmente al flujo térmico por conducción, que va progresivamente profundizando hasta que desaparece por homogeneización de la columna del agua; la más profunda de origen hidrodinámico permanece estable.

Los parámetros fisicoquímicos muestran una evolución estacional y en profundidad; además, muestran correlaciones entre sí, y con las condiciones ambientales e hidrológicas del embalse.

Key words: reservoir, characterisation, physico-chemical, thermocline.

1. INTRODUCCIÓN.

A lo largo de la historia el ser humano siempre ha estado fuertemente unido a las masas de agua, desde los asentamientos nómadas que se agrupaban en torno a ríos y lagos hasta las grandes civilizaciones, como en Egipto o Mesopotamia. Siempre se ha tendido al uso de este recurso como si fuese inagotable e imperturbable por parte de las actividades humanas, en cambio, con el tiempo se ha descubierto que no es así, que ni es infinito ni es imperturbable, y para poder conocer cómo cambia una masa de agua debemos conocer sus características fisicoquímicas, lo cual se complica en el caso de un embalse donde son afectadas tanto por las cuencas vertientes como de la propia morfología del embalse, y en especial por el régimen de explotación del mismo.

España, según los modelos climáticos, será uno de los países más castigados en un futuro próximo debido al cambio en el patrón de precipitaciones en relación al cambio climático (Guerreiro, S.B. (2016)). Por esto las masas de agua (embalses) juegan un papel fundamente tanto para el regadío como el abastecimiento humano. Sin embargo, no sólo es importante la capacidad de almacenamiento de los embalses, sino también, la calidad de la misma. La eutrofización de las masas de agua por un exceso de nutrientes debido a fertilizantes y/o residuos agrícolas, son uno de los principales problemas de la calidad de las aguas en muchos embalses de la península (Palau, A. (2003)). Para poder conocer qué tipo de perturbaciones afectan a las masas de agua, es necesario, entre otras cosas, estudiar sus características físico-químicas. Sin embargo, dado la naturaleza artificial de los embalses, estas características puede variar mucho más que las masas de agua naturales (lagos), debido a las diferencias en las cuencas que vierten sus aguas al embalse, la propia morfología del embalse y el régimen de explotación.

Los embalses que poseen cierta profundidad, al igual que los lagos naturales, presentan una estratificación de las aguas. Esta estratificación no es constante y existe proceso de mezcla de aguas a lo largo del año. Así, se diferencian tres capas (Fig. 1) de agua estratificadas (Arbat-Bofill, M. 2005): i) el epilimnion, compuesto por un conjunto de capas superficial donde los procesos fotosintéticos predominan sobre los de consumo de oxígeno, ii) metalimnion, compuesto por las capas intermedias donde existe un gradiente térmico acusado, y iii) el hipolimnion, conjunto de capas más profundas donde la temperatura es más fría o se mantiene más estable respecto a los cambios atmosféricos. Las aguas superficies (epi y parte del metalimnion) están separadas de las aguas profundas por una capa denominada termoclina, la cual aparece en el metalimnion debido al gradiente térmico existente. Esta capa, puede resultar un obstáculo a la hora de intercambiar agua o partículas en sentido ascendente desde el hipolimnion al epilimnion.

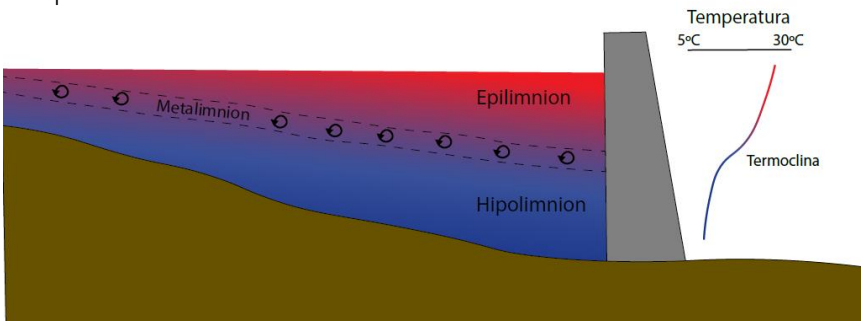


Figura 1: *Representación esquemática de las distintas capas en un embalse estratificado, la curva de temperatura en profundidad y la termoclina.*

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo de investigación es la caracterización físico-química, térmica y la evolución estacional de las aguas del embalse de El Val.

Además del objetivo principal, otros objetivos del trabajo son, relacionar las características térmicas observadas en las aguas del embalse con el funcionamiento hidrológico de este. También se pretende relacionar los parámetros fisicoquímicos entre sí, y con las condiciones ambientales e hidrológicas del embalse.

Para la consecución de estos objetivos se ha realizado un planteamiento del trabajo y una metodología que de forma detallada se muestra en el apartado 4, metodología.

3. CONTEXTO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

3.1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA.

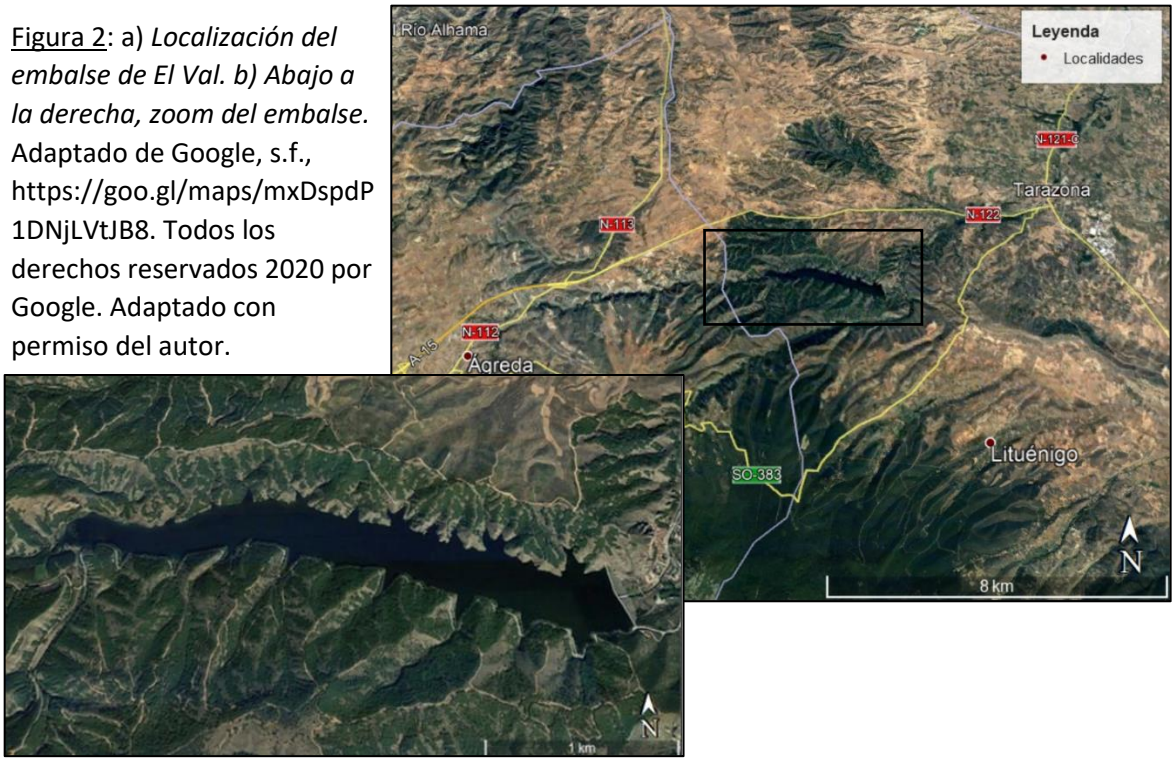


Figura 2: a) *Localización del embalse de El Val. b) Abajo a la derecha, zoom del embalse.* Adaptado de Google, s.f., https://goo.gl/maps/mxDspdP1DNjLVtJB8. Todos los derechos reservados 2020 por Google. Adaptado con permiso del autor.

El embalse de "El Val" se localiza a unos 500m al oeste de la localidad de Los Fayos (Fig. 2) situada en el extremo oeste de Aragón, Noreste de España.

Este es accesible por la CV-639 si se accede atravesando Los Fayos, a la cual se puede llegar desde la N-122, o siguiendo la SO-382 tomando el camino asfaltado en la rotonda a la altura del cruce con la CV-610, siguiendo la señalización que marca Los Fayos, hasta llegar a la presa del embalse.

3.2. CONTEXTO GEOLÓGICO.

El embalse estudiado se encuentra en el curso del río Val, sobre materiales terciarios, de la formación Fitero, los cuales destacan en este punto concreto por ser potentes bancos de conglomerados con origen en abanicos aluviales, que dan lugar a fuertes escarpes. (Fig. 3).

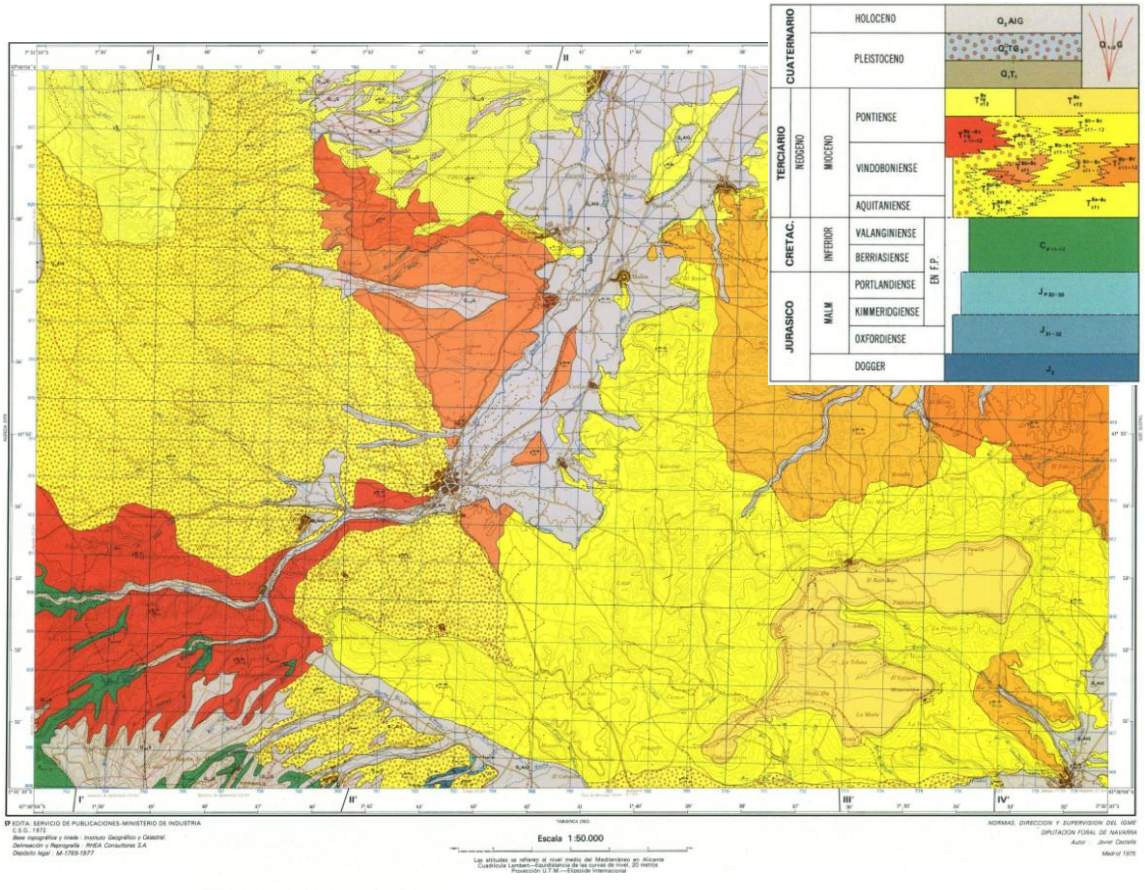


Figura 3: M*apa geológico del entorno del embalse, Castiella,J. (1997).*

Dichos conglomerados del Vindovoniense-Pontiense se encuentran fuertemente cementados, además presentan intercalaciones de finos niveles de geometría lenticular de arcillas, limos y areniscas.

Hacia la cola del embalse se puede observar un cambio litológico que corresponde al afloramiento de los materiales de las facies "Purbeck", constituidos por depósitos del cretácico inferior continental, depositados en ambientes deltaicos y formados por secuencias que alternan cuarzoarenitas , limolitas cuarciarenitosas verdes y amarillentas y margas verdes arenosas con intercalaciones de calizas castañas o negras, aunque en algunos puntos como la parte más cercana a la cola se aprecian facies de calizas tableadas; estos materiales que se encuentran bajo la cobertera terciaria y cuaternaria, solo afloran localmente en las partes profundas de los barrancos y desfiladeros del valle del Val, de acuerdo con Castiella,J. (1997).

3.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EMBALSE

El embalse de "El Val" posee una geometría alargada debido a que se encuentra sobre un valle encajado que condiciona su morfología, además posee múltiples salientes hacia la montaña, que no son más que barrancos afluentes del cauce principal inundados. El embalse recibe el agua de dos ríos, el Val y el Queiles, cuyo caudal de entrada se produce a través de una conducción de 693m de longitud de túnel y 133m de canal a cielo abierto con un caudal máximo de 20 m^3/segundo, y el Val.

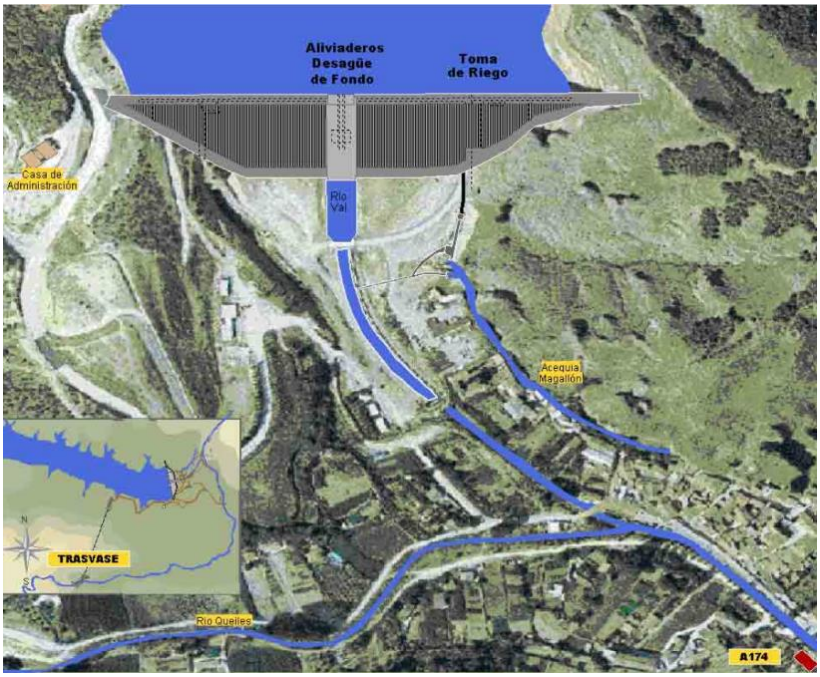


Figura 4: *Esquema en planta del embalse del val, extraído de* http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/datos/ficha/estacion:E071.

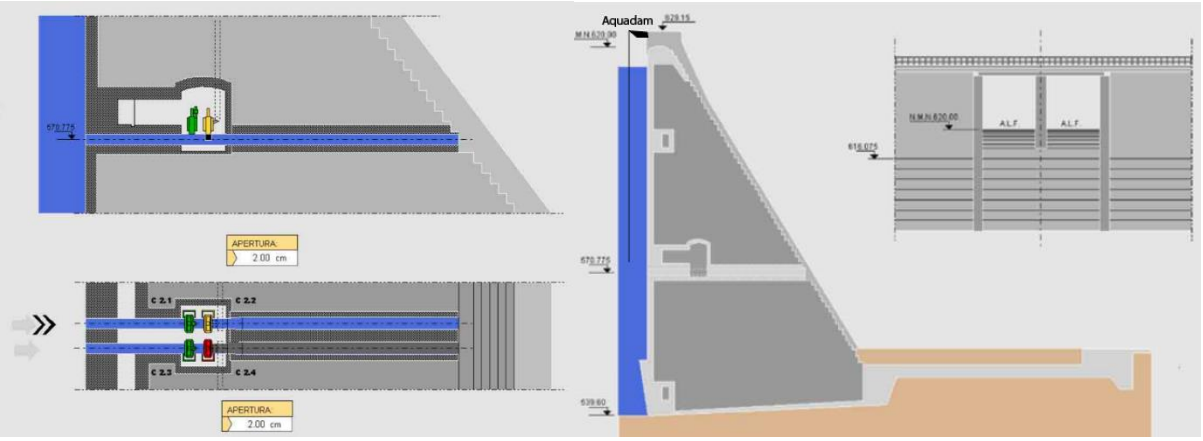


Figura 5: *Esquema en sección del aliviadero y cuenco amortiguador. Extraídas y modificadas de* http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/datos/ficha/estacion:E071.

El embalse tiene una capacidad de 25 hm^3 (24 hm^3 efectivos) con una superficie inundada de 112.23 ha y una cota máxima de embalse a 620 msnm. La presa de 94.4 m totales de altura y presenta dos salidas de agua, situadas a distinta cota, una salida alimenta la acequia Magallón que atraviesa la localidad de Los Fallos por su parte alta, la otra corresponde a dos desagües de fondo, ambos a la misma cota, y alineados en la vertical con el aliviadero (Figs. 4 y 5), datos de acuerdo con Confederación Hidrográfica del Ebro (2018).

Sus aguas están destinadas principalmente al riego y al abastecimiento de la población, con un régimen de explotación sin grandes variaciones entre entradas y salidas de agua, el embalse presenta además un tiempo de residencia del agua (para el año 2018-2019) de 7,74 meses, muy alto en comparación con otros embalses de la cuenca del Ebro, según dicta Duran, C (2010).

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. OBTENCIÓN DE DATOS

Cabe destacar que el grueso de los datos con los que se trabaja procede de la Confederación Hidrográfica del Ebro, salvo una pequeña parte obtenidos mediante muestreo propio a lo largo de los ríos que confluyen en el embalse.

Se han utilizado diversas bases de datos de la Confederación Hidrográfica del Ebro, CHE, parcialmente obtenibles a través del Sistema Automático de Información Hidrológica, SAIH. Los datos recopilados han sido los siguientes:

-Datos quinceminutales diarios para el año 2019 de las estaciones E071-Embalse de Val, EM71-Estación Meteorológica del Val que corresponden:

-Nivel y volumen de agua del embalse del Val.

-Precipitación acumulada al día en el embalse del Val.

-Temperatura y radiación solar en el embalse del Val.

-Datos de los valores cada 6 horas (año 2019) para diferentes profundidades de las siguientes variables del agua del embalse:

-Temperatura

-pH, conductividad, oxígeno disuelto, turbidez y clorofila “a”.

Figura 6: Sonda Aquadam, extraído de https://www.saicaebro.com/redalerta/embalsesIntro.php.

Estas medidas se han obtenido a través de la sonda Aquadam de Adasa Sistemas, denominado así comercialmente, y que se puede observar en lo alto de la presa del embalse (Figs. 5, 6 y 7). Este equipo está compuesto por un sistema automático de posicionamiento en altura, una sonda multiparámetro, que será la encargada de mostrar las medidas citadas partiendo del mediodía en horario GMT (13:00 en horario de invierno, 14:00 en verano) para una profundidad hasta la cota 573 m.sn.m. La sonda incluye también un autómata de gestión y un sistema de comunicaciones que transmite la información a un centro de control.

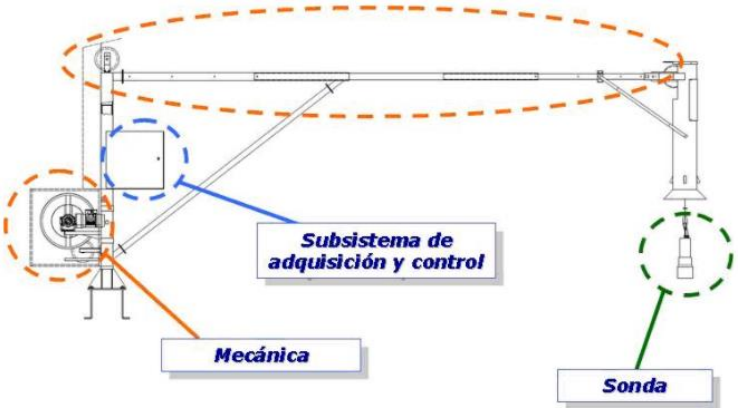


Figura 7: *Esquema de la sonda extraído de https://www.saicaebro.com/redalerta/embalsesIntro.php*

Bajo petición a la CHE, a través del del Servicio SAIH se obtuvieron los valores de reserva diaria de agua en hm^3 en el embalse y los valores de caudal de salida medio diario en m3/s en el embalse para el año 2019.

Se han realizado medidas de la conductividad del agua en los ríos afluentes al embalse; para ello, se ha utilizado un conductímetro portátil, tratando siempre de medir en la zona de corriente en caso de los ríos y en las zonas más profundas en el caso de las medidas en masas de agua inmóviles como lo es el embalse. El conductímetro utilizado presenta una precisión a 25º de un $\pm$2% de acuerdo con el fabricante (información disponible en https://www.hannainst.es/parametros/4175-tester-ph-ce-tds-temperatura-impermeable.html#/460-rango_ce-0_00_a_20_00_ms_cm).

4.2. TRATAMIENTO DE DATOS

Se ha utilizado Excel para la selección y filtrado de los datos disponibles para obtener:

-De los datos meteorológicos cada quince minutos para todo el año:

-Los valores de radiación para el primer día de cada estación (21/03/2019 primavera, 22/06/2019 verano, 23/09/2019 otoño, 22/12/2019 invierno) a las mismas horas que la sonda Aquadam realiza sus muestreos (1:00, 7:00, 13:00, 19:00 en horario de invierno y 2:00, 8:00, 14:00, 20:00 en horario de verano)

-Los valores de temperatura atmosférica semanales a la hora en la que, ese día, la sonda alcanza su punto más profundo.

-Volumen y nivel del agua en el embalse diario, y reservas y salidas diarias.

-De las medidas de la sonda Aquadam (temperatura, pH, potencial redox, conductividad, oxígeno disuelto, turbidez y clorofila diarias), con sus 4 muestreos diarios a lo largo de la columna de agua:

-Los valores semanales obtenidos en el muestreo de las 13:00 horario de invierno, 14:00 horario de verano.

-Los valores diarios, para el muestreo de las 13:00 horario de invierno, 14:00 horario de verano de temperatura, para los días del 15/9/2019 al 15/11/2019, y para los 4 muestreos que realiza la sonda al día para los días del 3/11/2019 al 12/11/2019, y los días 21/03/2019 (primavera), 22/06/2019 (verano), 23/09/2019 (otoño), 22/12/2019 (invierno).

-Los valores de conductividad medidos en los ríos afluentes.

Una vez realizado el filtrado de los datos en bruto, se ha procedido a continuar con el tratamiento de estos, realizando las gráficas necesarias según se precise para permitir una interpretación optima de los datos. El tratamiento estadístico se ha realizado mediante los programas Excel y PAST (PAleontological STatistics) (Hammer et al., 2001).

5. RESULTADOS

En este apartado se van a exponer los resultados obtenidos respecto al régimen hidrológico del embalse, sus características térmicas, características físico-químicas estacionales y los cambios diarios que se suceden.

5.1. REGIMEN HIDROLÓGICO DEL EMBALSE

Este embalse recibe aportes de los ríos Val y Queiles. El Val es el rio en el que se encuentra el embalse, es un rio sin regulación anterior, que nace en la fuente de la Vomitrosa, Olvega y comienza a fluir en Ágreda. Posee un recorrido hasta el embalse de 10km en línea recta, durante este recorrido el río atraviesa materiales Jurásicos, concretamente Kimmeridgiense, con areniscas y limonitas; Cretácicos con calizas castañas y alternancias de cuarzoareniscas, hasta la zona cercana al embalse donde aparecen conglomerados (Rey de la Rosa, J y Rivera Navarro, S. (1985)). El paso por todos estos materiales le confiere al agua del rio Val unos valores medios de conductividad de 917 μS/cm; en la figura 8 puede verse el perfil de la variación de conductividad a lo largo de su recorrido desde Ágreda hasta el embalse.

El Queiles nace en el caudaloso manantial de Vozmediano (Soria), y sus aguas llegan al embalse a través de una conducción de 650m de longitud, por ello el aporte al embalse está condicionado por las dimensiones del canal. Las aguas de este río presentan una conductividad media de 443 μS/cm tal y como puede verse en la figura 8 apenas varia a lo largo del recorrido del río, por proceder toda del manantial citado.

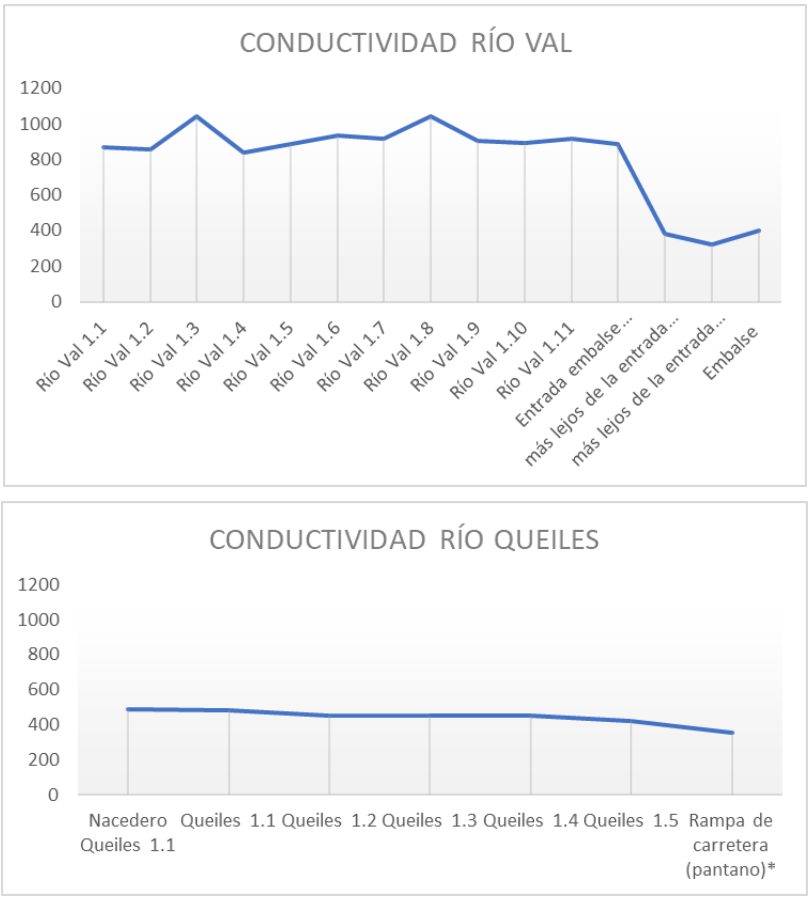


Figura 8: *Arriba la conductividad en los distintos puntos de muestreo en el río Val, y abajo la conductividad en los distintos puntos de muestreo en el río Queiles.*

En la figura 9 se muestra el volumen de agua del embalse (reservas) a lo largo del año 2019 y también las entradas y salidas del mismo. Tanto el volumen de reservas como las entradas son datos medidos, mientras que las salidas son datos calculados a partir de los anteriores. Presenta un volumen de salida media de 0.0803hm^3/día (0.929m^3/segundo), el valor máximo es de 0.2537 hm^3/día (2.9363m^3/segundo), y el mínimo es en ocasiones de 0. Las reservas medias son de 18hm^3 con un máximo de 22.369hm^3 y mínimo de 13.525hm^3.

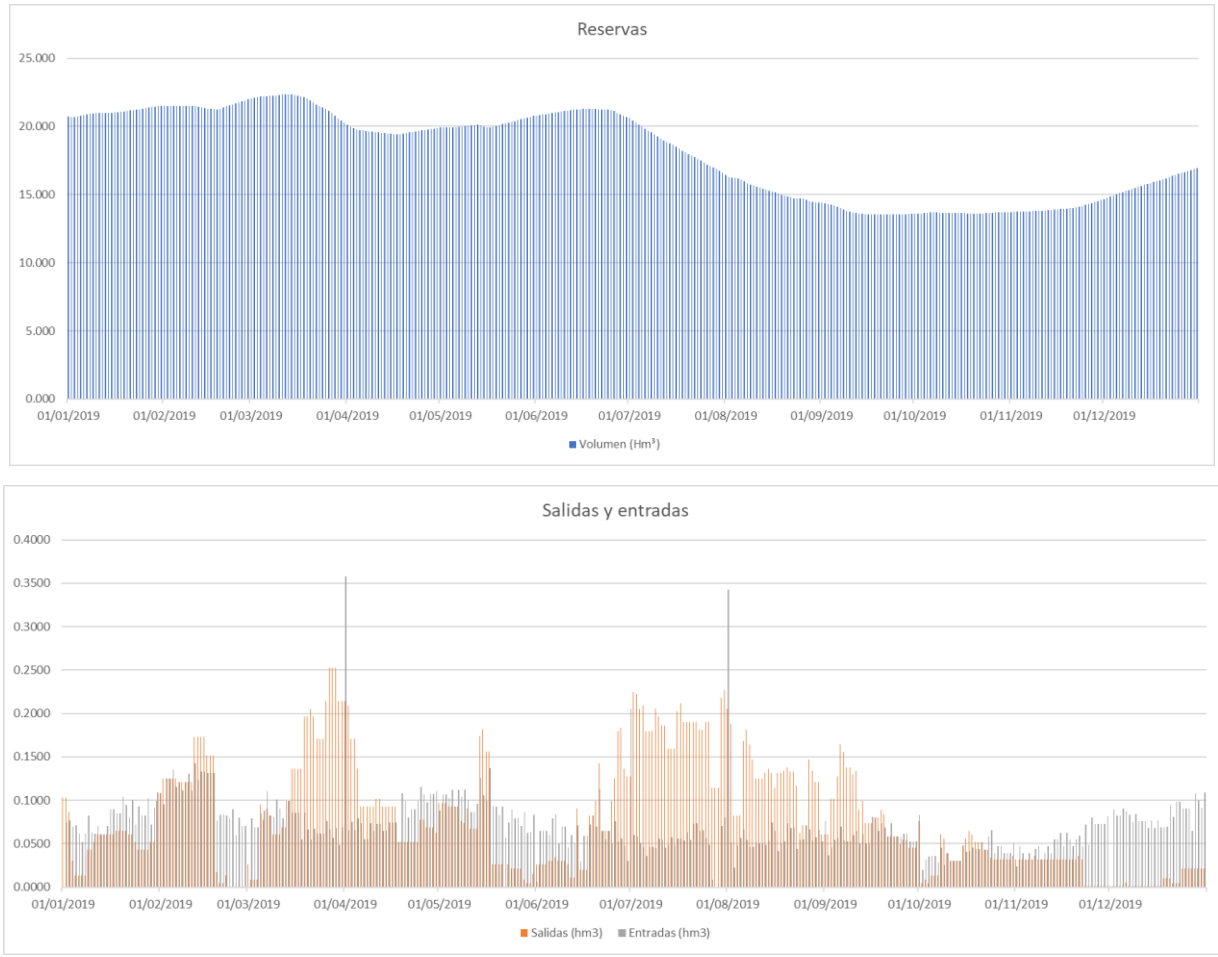


Figura 9: Datos para el 2019 de *reservas del embalse (en azul), salidas (en naranja) y entradas (en gris), todas ellas medidas en hm³.*

5.2 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS ESTACIONALES

Para conseguir realizar una correcta caracterización térmica, se han representado la totalidad de los datos en una única gráfica donde cada línea representa el perfil de una semana, ver figura 1a en el anexo 1. A partir de esta gráfica se han seleccionado los perfiles térmicos de mayor interés.

Como se observa en la figura citada, la temperatura en el agua del embalse presenta una envolvente que se estrecha hacia los valores más profundos, marcando una clara diferencia entre la variabilidad según se va profundizando, de manera que es cada vez menor según se profundiza.

La temperatura presenta unos valores medios de 13.8 ºC oscilando entre los 8.1 ºC y los 25.3 ºC en superficie y los 7.6 ºC y los 14.3 ºC en la cota 573 (dato más cercano al fondo que ofrece la sonda Aquadam), pudiendo observarse una termoclina durante el periodo de marzo a octubre.

La figura 10, muestra mediante una gradación de colores la temperatura del agua en la vertical del embalse a lo largo de todo el año; como puede verse temperaturas superiores a 20 ºC (color rojo) se registran desde los meses de junio a noviembre abarcando prácticamente la totalidad de la profundidad del embalse

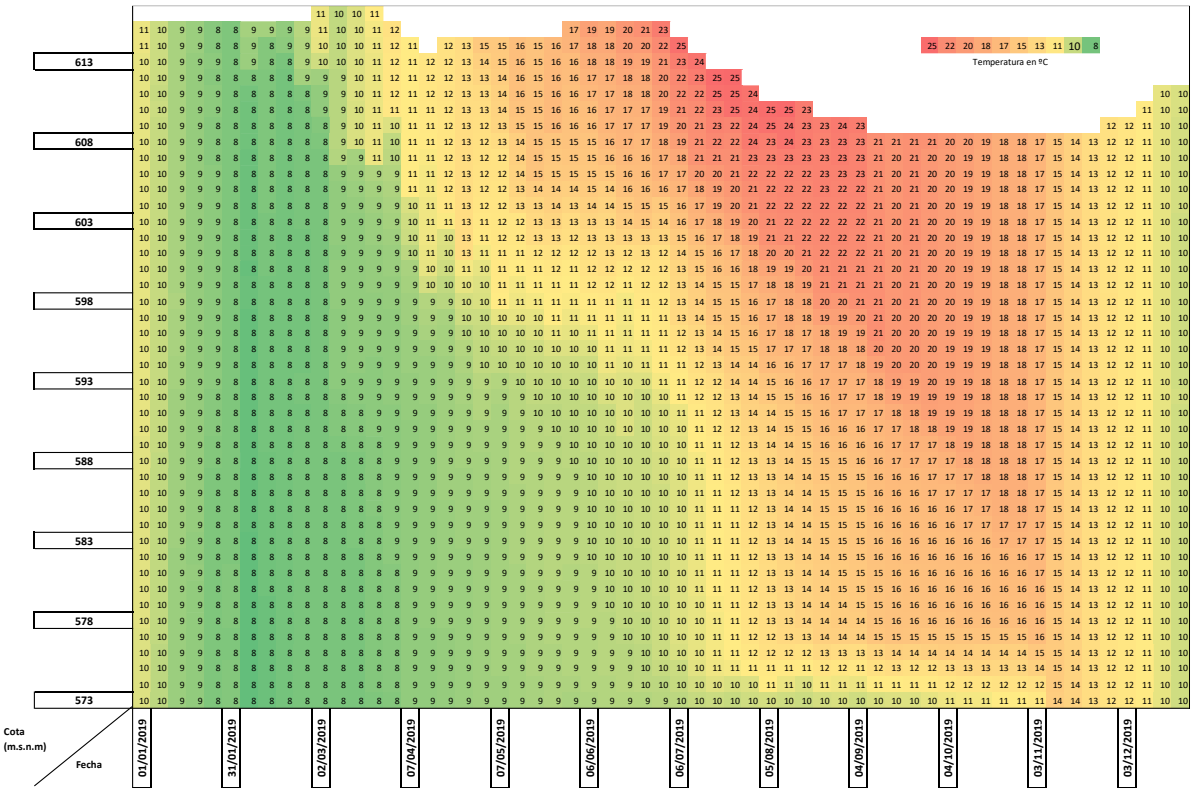


Figura 10: *Temperatura del agua en la vertical del embalse a lo largo de todo el año.*

Para explicar las variaciones de temperatura en superficie también se han considerado los datos de temperatura atmosférica.

La temperatura atmosférica se toma para el primer día de cada semana del año y varia a lo largo del año en una amplitud térmica anual de 48.3ºC, con un máximo de 41.7ºC y un mínimo de -6.6ºC, anexo 1, gráfica 3.

5.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS ESTACIONALES

La totalidad de los datos utilizados aparecen representados en las figuras 1b, 1c, 1d, 1e y 1f del anexo 1.

-La conductividad, como se puede apreciar en la figura 1b del anexo 1, presenta valores bastante homogéneos con una envolvente ajustada en una franja de 100 µS/cm de amplitud, a excepción de los valores comprendidos entre el 24/6 y el 23/8 que en superficie presentan valores menores de conductividad, (50 µS/cm menos que el valor más bajo de la envolvente); además se observan dos valores anómalos que alcanzan una conductividad en profundidad de hasta 200 µS/cm más que el valor más alto de la envolvente.

La conductividad varía entre los 370 µS/cm y los 428 µS/cm en la cota 573 m.s.n.m (dato más cercano al fondo que ofrece la sonda Aquadam), alcanzando de forma puntual incluso los 638 µS/cm y, en superficie, que varía entre los 283 µS/cm y los 405 µS/cm.

-Los valores de oxígeno disuelto en el agua tal y como puede verse en la figura 1c del anexo 1, presentan una gran variabilidad, aunque dentro de esta variabilidad se pueden distinguir dos grandes grupos de líneas, las pertenecientes a los valores entre los días 13 de mayo y 28 de octubre que presentan unos valores más altos en superficie que rápidamente disminuyen según se aumenta la profundidad; y los datos de los días restantes que aparecen en forma de líneas rectas que nos marcan una columna de agua con valores de oxígeno disuelto constantes.

Presenta valores máximos de 607 (mg/L) en el epilimnion, que disminuyen y alcanzan valores de condiciones anóxicas (<2 mg O_2/L) a partir de los 606 m.s.n.m, en el hipolimnion, anexo 1.

-El pH observable en el agua del embalse figura 1d anexo 1, presenta unos valores muy estables y sin variaciones de más de 1 hasta los 595 m.s.n.m donde la amplitud de la envolvente llega a tener hasta 2.7 de diferencia entre el valor mínimo y el valor más alto en superficie; pudiéndose observar cerca de esta, cambios muy rápidos según se aumenta la profundidad

Este presenta unos valores que oscilan entre 10.2 y 7.3 en el epilimnion, y entre 8.15 y 6.93 en el hipolimnion, anexo 1.

-La clorofila a presenta, según se observa en la figura 1e anexo 1, unos valores muy constantes entre la cota 595 y la cota 573 m.s.n.m a excepción de una pequeña curva entorno a la que se observa un leve aumento de esta, de 20 µg/L, a 575 m.s.n.m; y en contraste con la parte superior de la gráfica donde se observan grandes cambios, siempre con los valores máximos a pocos metros bajo la superficie, descendiendo en profundidad.

Su concentración varía en torno los 118 (µg/L) en la superficie y los 1 (µg/L) cercanos a la cota 573 (dato más cercano al fondo que ofrece la sonda Aquadam), anexo 1.

-La turbidez medida en NTU, como se puede apreciar en la gráfica f anexo1, presenta valores muy dispares a primera vista, pero se puede diferenciar una envolvente para la mayor parte de los datos, entre 0 y 50, quedan fuera de esta los valores entorno a la cota 573 m.s.n.m que alcanzan los 297 NTU y los valores de algunos días puntuales que poseen valores más altos a lo largo de toda la columna y alcanzan valores de hasta 263.

Los valores más altos se alcanzan siempre en profundidad, en superficie, salvo días puntuales no supera los 50. Presentas curvas con geometrías lineales y estables hasta las cotas cercana a 575 donde se observan los valores más altos.

5.4. CAMBIOS DIARIOS

A lo largo de un día se pueden observar variaciones de distinta magnitud en los valores de temperatura, pH, conductividad, oxígeno disuelto y clorofila, para observar estas variaciones, se han seleccionado los siguientes días del año: 21/03/2019, 22/06/2019, 23/09/2019 y 22/12/2019, que son representativos de las estaciones. Los datos del año aparecen recogidos en las gráficas 2a, 2b, 2c, 2d y 2e del anexo 1.

En los perfiles de temperatura (figura 2a anexo 1) se observa un rango de variación muy estrecho siendo máximo en el mes de junio, con 1.1ºC de variación diaria en la zona más superficial del perfil.

En los perfiles de pH (figura 2b anexo 1) las variaciones que se observan en los días seleccionados son evidentes en el epilimnion en el mes de septiembre, con un rango máximo de variaciones de más de 1.04 (entre 8.77 y 7.73).

En los perfiles de conductividad (figura 2c anexo 1) no se manifiestan variaciones diarias notables siendo, siendo la más relevante la del mes de junio con 36 µS/cm.

En los perfiles que miden el oxígeno disuelto (figura 2d anexo 1) se observan las diferencias más notables en la superficie, con valor de 3.3 mg/L en septiembre (entre 6.5 y 3.2 mg/L). Para apreciar mejor las variaciones diarias del oxígeno disuelto en el agua, se ha realizado una gráfica (figura 3b anexo 2) con sus variaciones en superficie, para los días considerados en cuatro momentos de cada día (1:00-2:00, 7:00-8:00, 13:00-14:00, 19:00-20:00).

Los perfiles de clorofila "a" (figura 2e anexo 1) presentan variaciones notables sobre todo en septiembre, donde alcanza una diferencia de 37.9 µg/L (entre 41.4 y 3.5 µg/L). En la figura 3b anexo 2 se muestran las variaciones en superficie de los cuatro días considerados a lo largo del día. Se destaca la inexistencia de clorofila en invierno, en el resto de las estaciones con valores máximos y mínimos entre 63.1 y 32.6 en septiembre.

Por la posible relación de los valores de clorofila "a" con la radiación solar se han tenido en cuenta los valores atmosféricos de esta radiación a lo largo de cada día al igual que el resto de los parámetros físico-químicos (gráfica 4a, 4b y 4c anexo 1), los valores máximos aparecen en las horas medias del día (13:00, 14:00).

6. DISCUSIÓN

6.1. RÉGIMEN HIDROLÓGICO

Considerando las variaciones de los valores de volumen de reservas de agua en el embalse, así como las salidas al mismo (5.1. régimen hidrológico del embalse) se deduce que las aportaciones de agua son constantes, lo cual es esperable ya que la entrada principal es un canal que deriva agua de un rio con una excelente regulación natural (acuífero que da lugar al manantial de Vozmediano) y una secundaria, río Val, que tiene caudales muy limitados y no presenta avenidas significativas. Las salidas son más relevantes en la época de riego (primavera, verano) llegando a triplicar las entradas. De todos modos, el embalse se mantiene con un elevado volumen de reservas de agua todo el año, y variaciones de reserva reducidas. Consecuentemente el agua tiene un periodo de renovación largo respecto a lo habitual en otros embalses de la cuenca del Ebro (se estima en más de siete meses de acuerdo con el informe técnico de Duran, C (2010) frente a los valores habituales que son inferiores a cuatro meses).

En base a las conductividades medidas en distintos puntos a lo largo de los dos ríos que vierten agua al embalse (anexo 2 tabla 1 y figura 2) y comparándola con la conductividad que encontramos en el embalse, junto a la confluencia con el río Val, y junto a la presa (sonda

Aquadam), se puede conocer cuál de los dos ríos es el que presenta un mayor aporte, y condiciona más las características físico-químicas del agua del embalse.

Los datos tomados en ambos ríos, en los tramos desde su nacimiento al embalse, presentan conductividades distintas, el Val presenta una conductividad que oscila entre los 840 µS/cm y los 1041 µS/cm (valores pico que se observan en surgencias junto al río (anexo2)), en cambio el Queiles presenta valores mucho más bajos entre los 423 µS/cm y los 490 µS/cm (valor este procedente de su nacedero principal (anexo 2 tabla 1)). Comparando estos valores con los obtenidos del embalse, tanto en días de campo como con los que nos proporciona la sonda Aquadam, se puede apreciar como los valores del embalse (principalmente entre 370 µS/cm y 430 µS/cm) encajan mucho mejor con los valores de conductividad del Queiles y son muy dispares respecto a los del Val. Además, en la zona donde se juntan las aguas del río Val con las del embalse (10m desde la desembocadura de este) se observa como la conductividad cambia abruptamente para acercarse a los valores del río Queiles, figura 11.

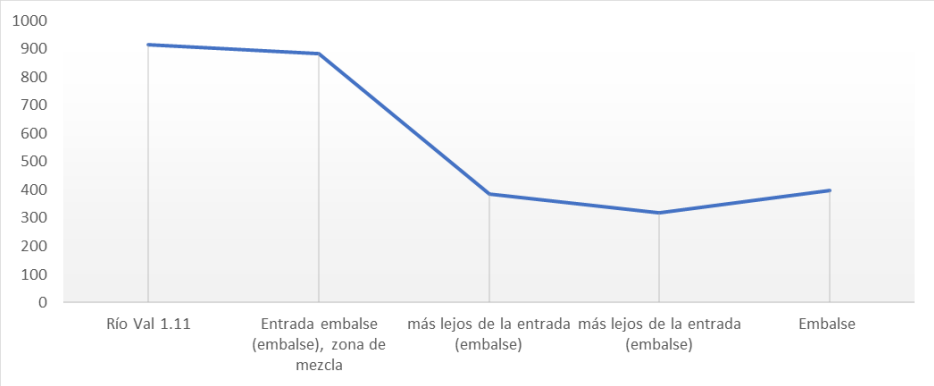


Figura 11: *Datos de conductividad en µS/cm, para puntos más lejanos de la desembocadura de izquierda a derecha.*

Con todo esto se puede deducir que a pesar de que el embalse está en el rio Val las aguas vienen principalmente del río Queiles.

6.2. CARACTERIZACIÓN TÉRMICA ESTACIONAL

6.2.1. Temperatura en profundidad.

En la figura 12 puede verse como las variaciones de temperatura semanal de la atmósfera se transmiten en el agua del embalse a diferentes profundidades. Se destaca la rápida atenuación de las oscilaciones térmicas semanales (cambios meteorológicos) ya casi desaparecidos en la superficie del agua y prácticamente inexistentes en profundidad.

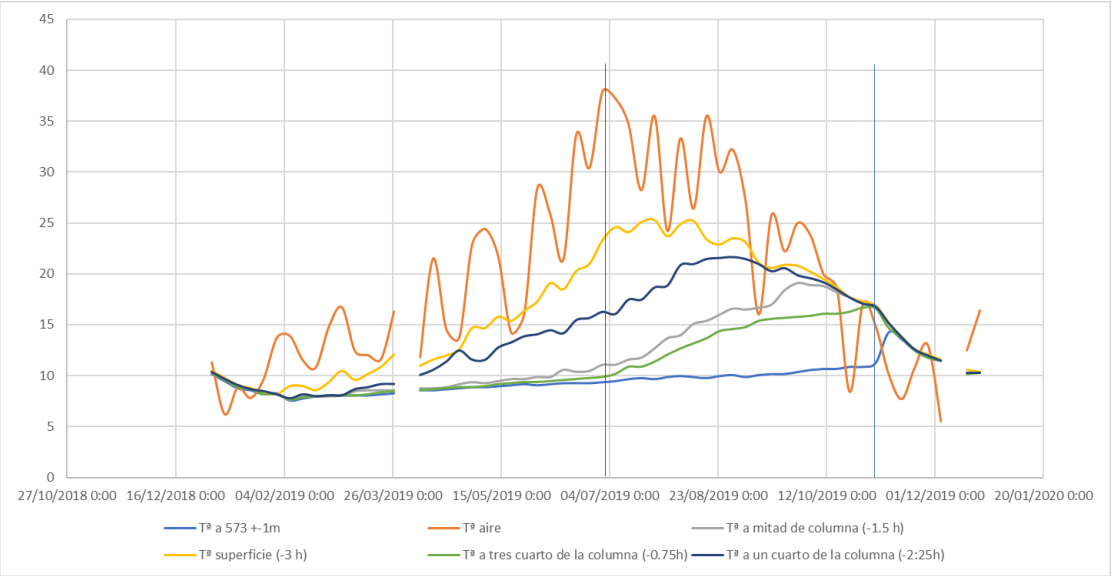


Figura 12*: Datos a lo largo del año de temperatura, atmosférica y a diferentes cotas del embalse, editada para mostrar en rojo donde se encuentra el pico térmico en la atmósfera, y en azul el pico térmico a la cota más profunda que registra la sonda Aquadam.*

Por el contrario, la oscilación térmica estacional en la atmósfera sí se transmite en el agua a todas las profundidades. Se destaca la atenuación, y el retraso (lag) de la onda térmica atmosférica, como puede verse en la figura 12.

Con todo esto se podría determinar que existe un *lag* o retraso de 4 meses entre el pico de temperatura en superficie y en la columna de agua a ¾ de profundidad, haciéndose este retraso cada vez menor con las partes más someras; de menos de 3 meses a mitad de la columna y de dos meses con la parte más cercana a la superficie.

Como se puede observar en la tabla 1, obtenida utilizando PAST, los valores de temperatura atmosférica presentan una alta correlación respecto a los valores de temperatura en la superficie del agua y a ¼ de profundidad de la columna de agua. En cambio, estos no presentan ninguna correlación respecto a los datos de temperatura a mayor profundidad, estos se encuentran correlacionados con los niveles adyacentes, ¼ de profundidad con ½ de profundidad, ½ de profundidad con ¾ de profundidad.

Se toma en todo momento el valor a tres cuartos de la columna medida ya que el dato de máxima profundidad medida se encuentra controlado por un evento de termoclina como se explica en el siguiente apartado

Tabla 1: Correlación completa entre los valores de temperatura atmosférica y a diferentes profundidades en la columna de agua, en rojo se muestran los valores con correlación notable (R^2), estadísticamente significativos (valor de p < 0,0001) y su valor de p en azul.

	T aire	T supercie	T a 1/4	T a 1/2	T a 3/4	T a 573
T aire		2.05E-17	2.25E-09	1	1	0.11964
T supercie	0.86711		1.53E-22	0.17058	1	1
T a 1/4	0.72272	0.91485		2.50E-05	6.68E-03	1
T a 1/2	0.12664	0.33015	0.58184		1.94E-26	1
T a 3/4	-0.033437	0.17764	0.44631	0.93891		1
T a 573	-0.3451	-0.1267	-0.04408	0.093605	0.19678	

6.2.2. Caracterización de la termoclina

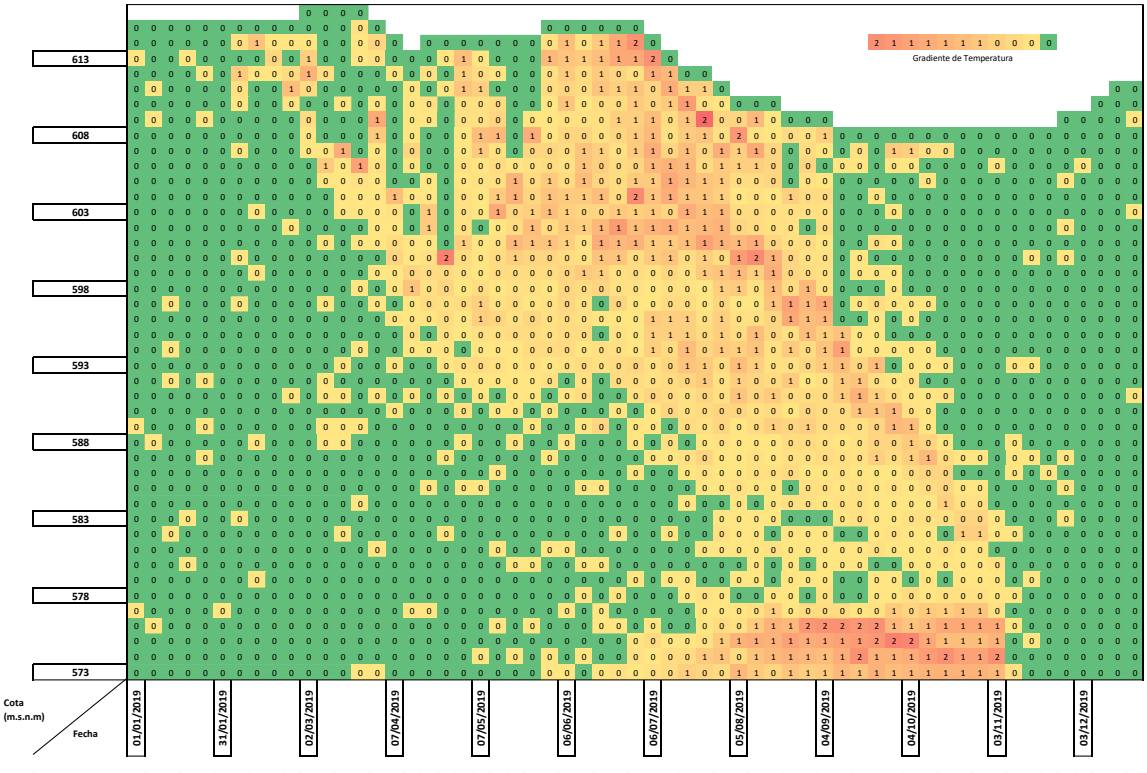


Figura 13: *Gradiente de temperatura en la columna de agua a lo largo del año.*

En la figura 13 y en la 14 puede verse cómo la termoclina (o máximo gradiente de temperatura) comienza a formarse durante la primera semana de febrero en los niveles más superficiales y va profundizando hasta los 601m.s.n.m de cota (dentro del segundo cuarto de la columna de agua) que alcanza durante la última semana de abril.

Además de esto en la figura 13 se muestra cómo en la última semana de junio se comienza a formar una segunda termoclina de profundidad estable entre las cotas 573 y 577 m.s.n.m. Se deduce que esta segunda termoclina a diferencia de la primera que tiene un origen principalmente por conducción térmica, presenta un origen hidrodinámico ya que se produce justo bajo la corriente que producen los desagües de fondo (a 570 m.s.n.m) que permanece estable confinando una masa de agua fría y estable. Existen otros ejemplos de formación de estas dobles termoclinas en otros embalses como el de Matalavilla caracterizado por Ramos-Fuertesa, A. et al. (2017).

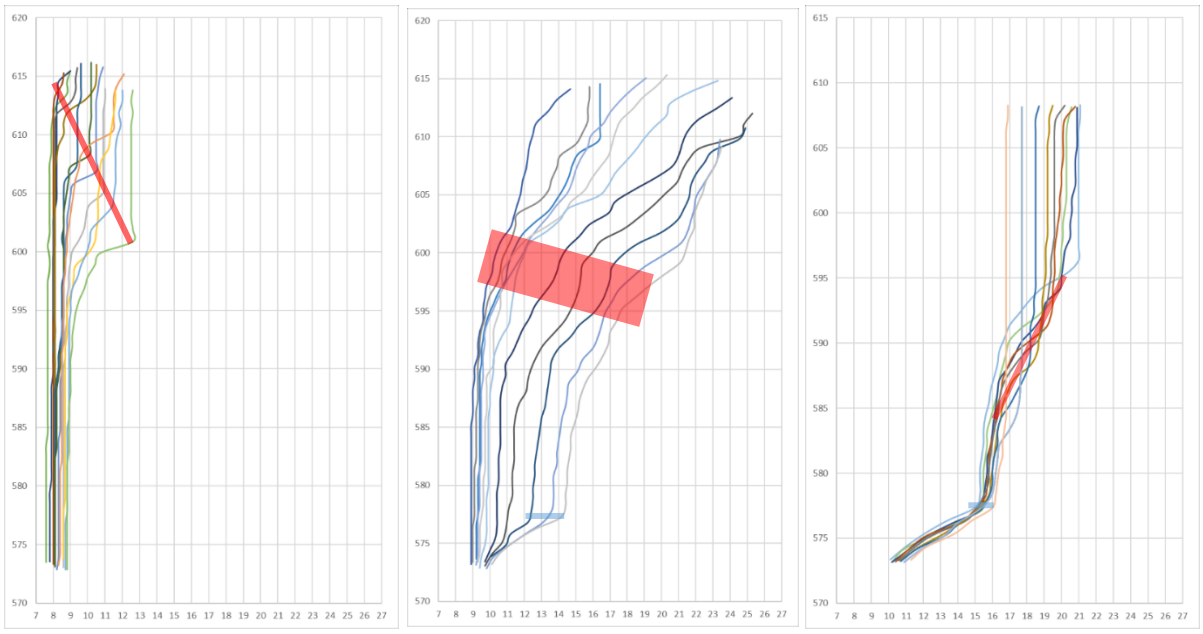


Figura 14: *Perfiles de temperatura-profundidad del agua y evolución de la termoclina. El gráfico de la izquierda muestra la profundización de la termoclina de origen conductivo (de la primera semana de febrero a la última de abril); en el gráfico central la termoclina de origen conductivo aparece más difusa, y la aparición de la termoclina de origen hidrodinámico (de la primera semana de mayo a la última de agosto); en el gráfico de la derecha la contracción de la termoclina de origen conductivo y continua profundización, es el paso previo a su destrucción (de la segunda semana de septiembre a la primera de noviembre).*

A consecuencia de esta termoclina hidrodinámica en la cota 573 m.s.n.m de profundidad, la temperatura presenta un comportamiento distinto al resto de la masa de agua (figura 15), calentándose muy despacio hasta el momento de ruptura de esta termoclina, que se puede apreciar a partir del día 10/11/2019 en la figura 13 donde se ve claramente la homogeneización de la columna y en la figura 15 donde se aprecia el brusco aumento de temperatura en contra del resto de la masa de agua que se enfría.

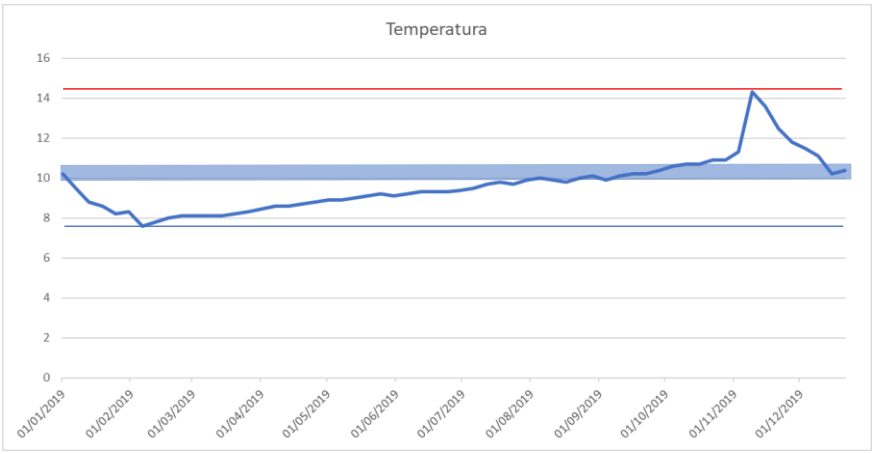


Figura 15: *Datos de temperatura a la máxima profundidad que alcanza la sonda Aquadam, 573 m.s.n.m de cota, a lo largo del año, modificada indicando la franja principal sobre la que oscila (azul), y la mayor diferencia de temperatura (azul, mínimo y rojo máximo).*

Con posterioridad entre el 3 de noviembre y el 12 de noviembre de manera repentina, debido a un proceso de mezcla de aguas se puede observar una homogeneización de la temperatura (figuras 13 y 16) que conlleva a la ruptura de la termoclina y que se aprecia desde la segunda semana de noviembre hasta la última semana de enero, figura 10.

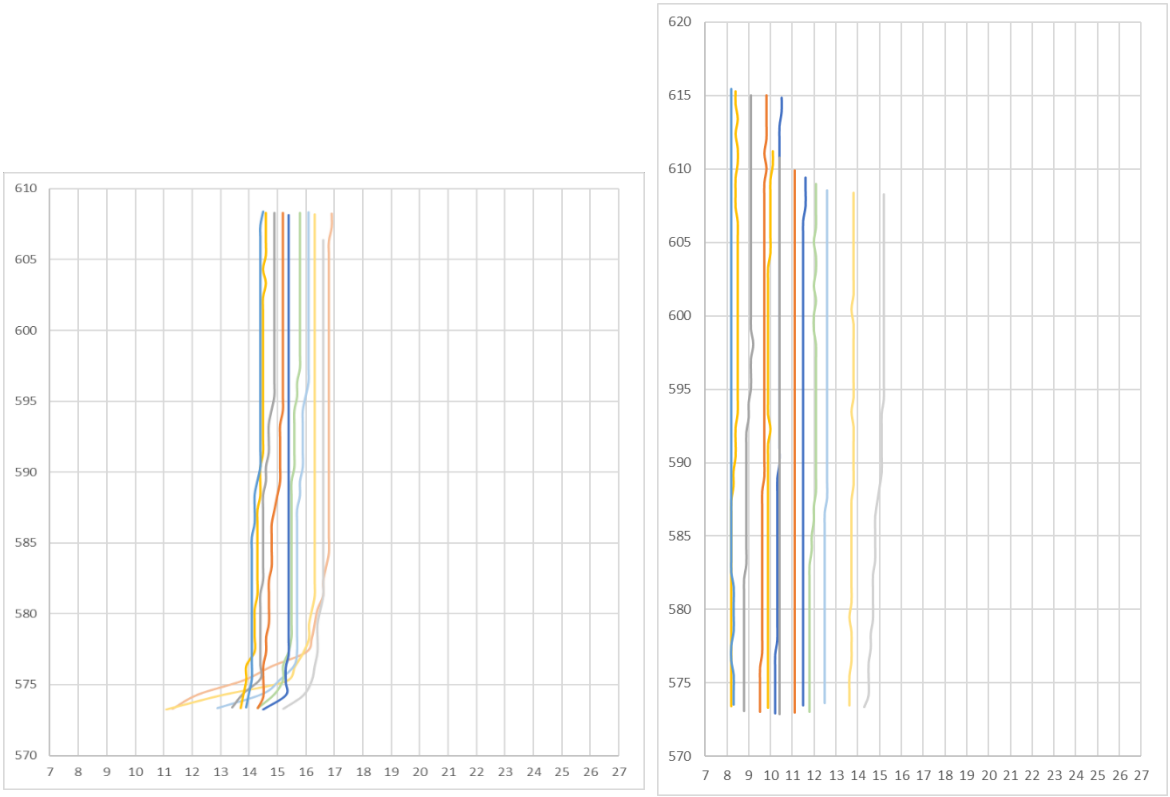


Figura 16: *Desaparición de la termoclina, a la izquierda se muestran los datos de los días del 3 de noviembre al 12 de noviembre, y a la derecha los de los días de la segunda semana de noviembre a la última semana de enero.*

Conociendo cuántas veces se mezcla el agua y en qué periodos se determina que se trata de un embalse holomíctico*[1] monomíctico*[2], de clima cálido, esto se determina a falta de saber si de verdad se mezcla toda la columna de agua, ya que no se conoce el comportamiento de esta a partir de los 573 m.s.n.m, si no ocurriese mezcla completa podría tratarse de un embalse meromíctico. El embalse presenta estratificación estival desde la primera semana de febrero hasta la primera semana de noviembre, y una masa uniforme de agua invernal en los meses desde la segunda semana de noviembre a la última semana de enero es decir presenta un comportamiento claramente estacional.

*[1] *Son lagos holomícticos los que tienen aguas que se mezclan completamente al menos una vez al año; a diferencia de un lago meromíctico en que el hipolimnion nunca se mezcla con el epilimnion.*

*[2] *Son monomícticos en los que las aguas se mezclan una vez al año, por causa de las variaciones de la temperatura, de modo homogéneo en un perfil vertical sin un gradiente de densidad.*

6.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA

A continuación, se exponen los resultados correspondientes a los datos de dos de las variables fisicoquímicas medidas, que son más significativas.

6.3.1 Clorofila "a"

Del gráfico 1e del anexo 1 se resaltan los valores tan elevados que en los meses de junio a septiembre aparecen en el epilimnion, que llegan a más de 100 µg/L, por lo que entra dentro de niveles de hipereutrófia (Fig. 17), causados por una muy intensa actividad biológica. Estos valores tan altos parecen estar en relación con vertidos inadecuadamente depurados del rio Val y del río Queiles, nota de prensa de la CHE en 2018 (file:///C:/Users/34679/Downloads/20180323%20Estudio%20embalse%20El%20Val%20_2_.pdf).

	Chla (µg/L)	Cla max (µg/L)
Ultra oligotrófico	≤1	≤25
Oligotrófico	≤2.5	≤8
Mesotrófico	2.5-8	8-25
Eutrófico	8-25	25-75
Hipereutrófico	≥25	≥75

Figura 17: *Clasificación trófica basada en límites fijos propuesta por la OCDE (1982).*

Se destaca también, la presencia sobre la cota 575 m.s.n.m (cerca del límite de medida de la sonda, en el último cuarto de profundidad) de un conjunto de valores anormalmente altos en clorofila, circunstancias que también se dan con la conductividad y la turbulencia (ver anexo 1 figuras 1e 1b y 1f), la interpretación de estos hechos estaría relacionada con el desembalse de agua en momentos puntuales a través de los desagües de riego o de fondo ubicados a 571 m.s.n.m y 570 m.s.n.m respectivamente. En la figura 18 se muestra una interpretación visual del proceso, el movimiento del agua por el desembalse provoca un aumento en los valores de turbulencia y un aumento en los valores de clorofila, debidos al arrastre de esta de los niveles más altos donde se produce; y también, un aumento en los valores de la conductividad causados por el aumento en el valor de la clorofila tal y como indican Clarke, R.A. et al (1997).

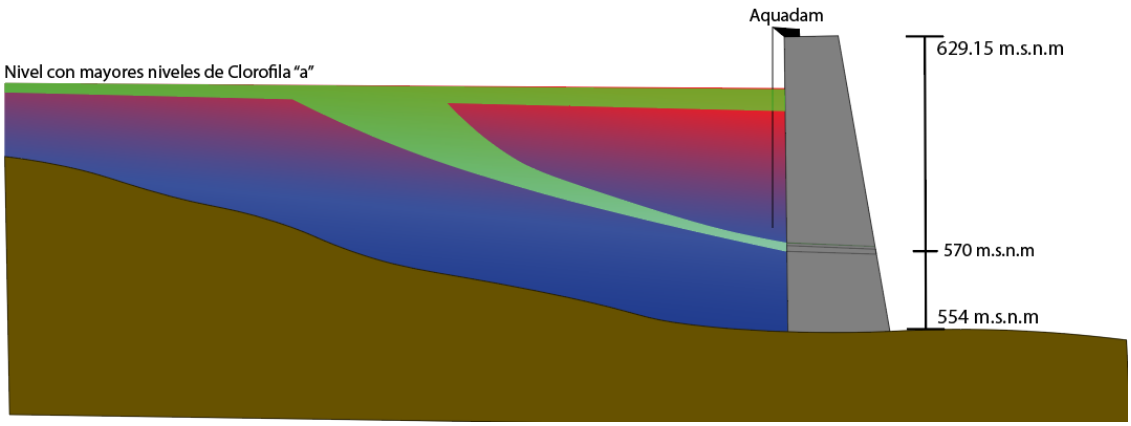


Figura 18: *Representación esquemática del efecto de succión que provocarían los desembalses mediante los desagües de riego o de fondo. La zona marcada en verde representa valores altos en clorofila.*

6.3.2 Oxígeno disuelto

De los datos de oxígeno disuelto se destaca la amplia zona de anoxia que existe en las aguas de este embalse (<2 mg O_2/L, según Wetzel, R (1975)), coincidiendo con los meses de mayor productividad de clorofila, y que llega a alcanzar 33.25m de columna (hasta donde alcanza la sonda, que realmente alcanzarían los 53m de columna), figura 19. Los valores de columna anóxica se prolongan durante semanas, desde mitad de agosto hasta la primera semana de septiembre.

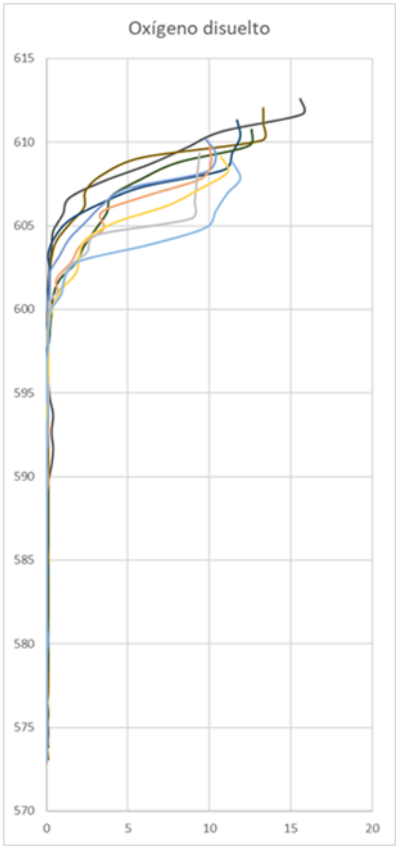


Figura 19: *Datos de oxígeno disuelto en O2/L respecto a la profundidad (cota en m.s.n.m) del periodo de máxima anoxia (del día 18/07/2019 al día 04/09/2019).*

En cambio, durante las semanas desde el comienzo del año hasta el 01/05/2019 y entre el 15/11/2019 al final del año, se observa que no existe anoxia, siempre referido a la profundidad de columna que alcanza a medir la sonda.

Con todo esto se deduce un problema de anoxia, relacionado con el proceso de eutrofización que sufre el embalse, que, en caso de continuar, puede conllevar problemas en su utilización tanto como abastecimiento de agua como para regadío, ya sea por problemas relacionados directamente con el metabolismo anaerobio típico de ambientes anóxicos que da lugar a ácidos sulfhídricos, causantes de un fuerte mal olor además de invalidar su uso como agua de boca, o por dificultades en su distribución producidas debido a la producción de compuestos orgánicos por parte del fitoplancton que producen un sobrecoste en la filtración de esta agua para utilizarla como agua de boca, e incluso taponamientos en las tuberías ya que los residuos finos orgánicos del fitoplancton son capaces de atravesar muchos filtros produciendo el crecimiento de colonias de animales capaces de producir atascos, como nematodos, esponjas, insectos o hidrozoos, de acuerdo con Moss, B (1998).

Se pueden observar además como las únicas grandes poblaciones de peces son carpas, debido a que se trata de ciprínidos que viven y se reproducen cómodamente en un amplio rango de condiciones ambientales como los contenidos en compuestos nitrogenados y una disolución de oxígeno en el agua cercana a la anoxia entre 3 y 5 mg/l según Armando, J (2011) donde la mayor parte de salmónidos no podrían sobrevivir ya que requieren disoluciones de oxígeno siempre mayores de 4 mg/l de acuerdo con Pérez, A. et. al. (2013).

6.4. CARACTERIZACIÓN DIARIA

Como se indica anteriormente las oscilaciones térmicas semanales apenas se manifiestan en la masa de agua, de la misma manera las oscilaciones diarias de temperatura prácticamente no tienen manifestación ni siquiera en la superficie del agua del embalse como se ve en la gráfica 6.

Otras variables ligadas a la radiación solar sí que presentan grandes oscilaciones diarias, especialmente en la superficie y cerca de ella, en concreto son las que se encuentran ligadas a la actividad biológica, clorofila "a" y oxígeno disuelto (Fig. 20).

Como puede verse en la gráfica el aumento en la radiación incidente provoca un aumento en la producción de clorofila y a su vez esta productividad vegetal, provoca un aumento en el oxígeno disuelto, siendo estas variaciones más notables en los meses de abril a septiembre. En los meses más fríos no existe producción vegetal apenas.

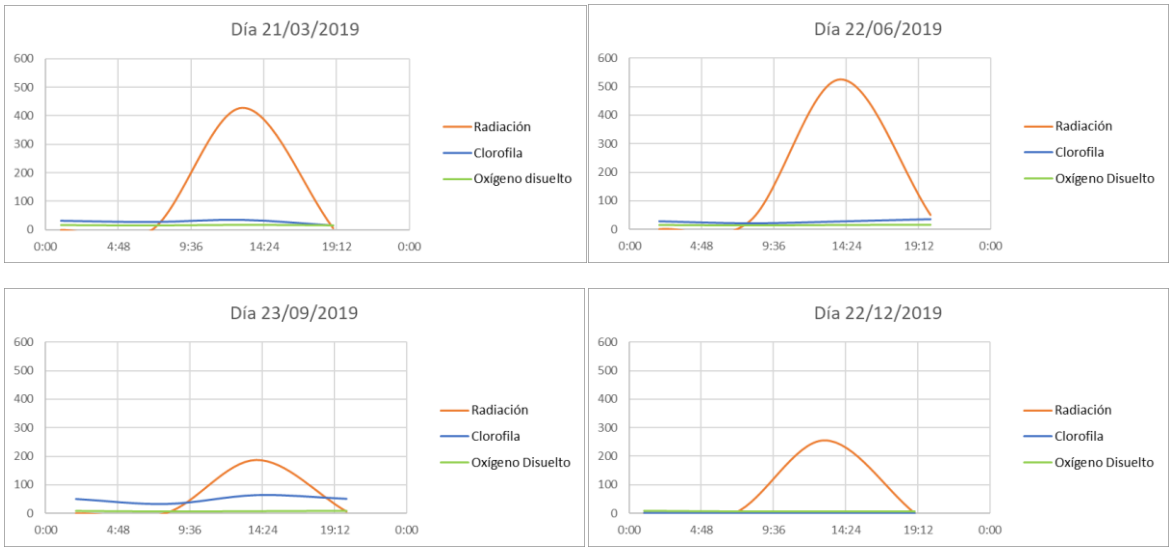


Figura 20: D*e arriba abajo y de izquierda a derecha, variación superficial de radiación clorofila y oxígeno disuelto, a lo largo de un día de cada estación, 21/03/2019, 22/06/2019, 23/09/2019 y 22/12/2019*.

7. CONCLUSIONS

The data provided by the Acuadam measuring probe allow us to make an adequate thermal and physical-chemical characterisation of the water in the reservoir, in terms of its variation in depth and of its seasonal-temporal variation.

The water temperature data indicate that this is a reservoir whose waters are totally mixed (holomictic), they mix once a year in the winter months (monomictic in a warm climate). The reservoir has "summer" stratification from the first week of February to the first week of November, and a uniform mass of "winter" water in the remaining months.

There are two distinct thermoclines, one linked mainly to thermal flow by conduction, which deepens until the water column becomes homogenised; and another thermocline of hydrodynamic origin which confines a mass of cold water at the bottom of the reservoir for four months of the year (July, August, September and October), due to the outflow of water through the reservoir's bottom drains. The breakdown of the hydrodynamic thermocline occurs simultaneously with the breakdown of the general thermocline, with the difference that the general thermocline disappears with a drop in temperature and the hydrodynamic thermocline disappears with a sharp rise in temperature.

All physico-chemical parameters show seasonal and depth evolution, and there are observable correlations between them. There is also a relationship between certain physicochemical parameters and solar radiation and, where appropriate, hydrodynamic processes such as outflows through bottom drains.

Solar radiation conditions the values of chlorophyll "a" and these, the values of dissolved oxygen, both seasonal and at depth.

Turbidity (water transparency) can be useful to characterise hydrodynamic phenomena in the reservoir, such as the movement of water towards the bottom drains, which causes the entrainment of more turbid water with anomalies in the chlorophyll "a" content (possible entrainment from shallower areas).

To complete the thermal and physico-chemical characterisation of the reservoir, it would be necessary to take measurements below the current measurement level (573 m above sea level) and thus identify the mass of water below the bottom drains. Water movements in the reservoir could be identified by means of a 3D thermal characterisation and of certain physico-chemical parameters such as chlorophyll "a" and turbidity, which could be done by means of different measurement profiles.

A potential thermal exploitation of the reservoir, based on the existence of a body of water with a stable temperature that is clearly different from the surface atmospheric temperature (thermal contrast), occurs below 573 m.a.s.l., with temperatures between 8 and 10ºC and duration, throughout the summer season.

Chlorophyll "a" values are very high in the surface layer of the reservoir and anoxia is present below 10 m depth, which would indicate a high degree of eutrophication.

The best characterisation of the eutrophication problem in the reservoir requires a proper assessment of the inflows to the reservoir, in particular the volumes of water flow and the amount of nutrients they carry. The measurements taken by the probe can enable active and immediate action to be taken at the reservoir outlets, allowing to minimise the effects.

8. BIBLIOGRAFÍA

-Arbat-Bofill, M. (2015). *Distribución de temperatura y velocidad en embalses Análisis numérico-experimental aplicado a los embalses de Sau (Ter) y Ribarroja (Ebro)*. Tesis doctoral, Programa de doctorado en Ingeniería Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, 318 p.

- Armando, J. 2011: *Evaluación de la etapa de levante de carpa común (Cyprinus Carpio) en sistemas cerrados de recirculación de agua*. Trabajo de fin de grado, Universidad Militar Nueva Granada, 58 p.

-Castiella, J., (1975). *Mapa Geológico de España 1:50000, Tarazona de Aragón, Hoja 320*. IGME, Madrid.

- Clarke, R.A., Stanley C.D., McNeal B.L., and MacLeod B.W. (1997): Relationship of Chlorophyll a Concentration to Seasonal Water Quality in Lake Manatee. *Lake and Reservoir Management,* 13: 253-258.

- Confederación Hidrográfica del Ebro (2018). Seguimiento de embalses 2018. 186 págs. más anejos. Disponible en PDF en la web: http://www.chebro.es

- Duran, C., (Dir.). (2010): *Asistencia técnica para el control de macrófitos: Mejora de la gestión de los embalses del Bajo Ebro. Barcelona* (Informe técnico). Confederación hidrográfica del Ebro, 151 p.

- Guerreiro, S.B., Kilsby, C.G. and Fowler, H.J. (2016): Rainfall in Iberian transnational basins: a drier future for the Douro, Tagus and Guadiana?. *Climatic Change,* 135: 467-480.

-Hammer, Øyvind, Harper, David A.T., and Paul D. Ryan, 2001. Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. Palaeontologia Electronica, vol. 4, issue 1, art. 4: 9pp

-Rey de la Rosa, J and Rivera Navarro, S, (1981) Mapa Geológico de España 1:50000, Agreda, Hoja 319. IGME, Madrid.

-Moss, B. (1998). *Ecology of fresh Waters*: *Man and Medium*. Blackwell, Oxford (etc) 557 p.

- Navarro Pérez, Padilla Bejarano, J y Prias Barragán, J. (2013). Construcción de un Sistema de Instrumentación para la Medición de la Temperatura, pH y Oxígeno Disuelto presente en la Piscicultura bajo Condiciones de Estanque Artificial. *Scientia Et Technica*, 18: 401-408.

-OCDE, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (1982): *Eutrofización de las aguas. Seguimiento, Evaluación y Control*. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, París, 154 p.

-Palau, A. (2003): Medidas de gestión y adecuación ambiental de embalses frente a la eutrofia. *Limnetica,* 22: 1-13.

-Ramos-Fuertesa, A., Palau, A. y Dolza, J. (2017): Influencia de la implementación de una central hidroeléctrica reversible en la hidrodinámica y el comportamiento térmico del embalse

de Matalavilla (Alto Sil, León, España). En: *V Jornadas de Ingeniería del Agua*. 24-26 de octubre. A Coruña.

-SAIH Ebro. Datos: Ficha E071. (2021). Tomada el 12 de noviembre 2020, de http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/datos/ficha/estacion:E071

- Tester pH / CE / TDS / Temperatura impermeable. (2021). Tomada el 1o de noviembre 2020, de https://www.hannainst.es/parametros/4175-tester-ph-ce-tds-temperatura-impermeable.html#/460-rango_ce-0_00_a_20_00_ms_cm.

-Wetzel, R. (1975). *Limnología*. WB Saunders, Filadelfia.