

El fitoplancton como indicador de calidad de masas de agua muy modificadas en la DMA. El lago artificial de As Pontes (A Coruña. España)

Phytoplankton as a quality indicator in heavily modified waters under the WFD. The artificial lake of As Pontes (A Coruña, Spain)

*M^a CARMEN LÓPEZ-RODRÍGUEZ¹, MANEL LEIRA², RAMÓN VALLE³ &
GABRIEL MOYÁ-NIELL⁴

1 Departamento de Botánica. Facultad de Biología. Universidade de Santiago de Compostela, 15782 Santiago de Compostela (España)

2 Facultade de Ciencias, Universidade de Lisboa, 1749-016 Lisboa (Portugal)

3 Responsable de Medio Ambiente. Centro Minero de As Pontes. 15320, As Pontes (España)

4 Departamento de Biología, Facultad de Biología. Universidad de las Islas Baleares. 07122, Palma (España)

**mdelcarmen.lopez.rodriguez@usc.es; mleira@fc.ul.pt; ramonjose.valle@enel.com; biel.moya@uib.es*

**: Corresponding author*

(Recibido: 07/04/2016; Aceptado: 05/10/2016; Publicado on-line: 02/11/2016)

Resumen

De acuerdo con la Directiva Marco del Agua de la UE (DMA), los lagos artificiales mayores de 0,5 km² tienen que ser controlados y gestionados con el fin de establecer o mantener un estado de la llamada buena calidad ecológica de las aguas. El lago de As Pontes es el lago artificial más profundo y más grande de España después de la inundación controlada del hoyo dejado por la mina tras 30 años de operaciones. La extracción de lignito pardo condujo a la formación de un gran lago (8,76 km² superficie y hasta 206 m de profundidad). El objetivo principal de este estudio es el análisis de los cambios en las comunidades de fitoplancton y el estado trófico, con el fin de evaluar la calidad del agua con vistas a su adaptación para un uso recreativo y deportivo y la obtención de un ecosistema sostenible. Para ello se realizaron muestreos desde 2009 a 2014, obteniéndose un catálogo florístico del fitoplancton que recoge un total de 126 taxa: 22 Cyanophyta, 47 Heterokontophyta de las cuales 42 son Bacillariophyceae, 3 Chrysophyceae, 1 Synurophyceae y 1 Xantophyceae, 6 Dinophyta, 2 Cryptophyta, 4 Euglenophyta, 14 Charophyta y 31 Chlorophyta. Ninguna de ellas se reconoce como tóxica, aunque se ha detectado una gran concentración de cistes, que asociamos a *Mallomonas* sp., a finales de agosto de 2013. El estado trófico actual del lago se corresponde con una situación de oligotrofia, produciéndose una disminución de la biomasa del fitoplancton y de los factores de producción a medida que se avanzaba en los muestreos. A partir de la composición cualitativa y cuantitativa del fitoplancton y de las variables que definen su estado trófico, podemos concluir que el lago se encuentra en buenas condiciones ecológicas, de acuerdo a los criterios de la DMA.

Palabras clave: As Pontes, DMA, España, estado trófico, fitoplancton, lago artificial.

Abstract

According to the Water Framework Directive of the EU (WFD), artificial lakes larger than 0.5 km² have to be monitored and managed in order to establish or maintain a state of the so-called good ecological water quality. Lake As Pontes is the deepest and largest man-made lake in Spain after the controlled flooding of the open pit left by the mine after 30 years of operations. The extraction of brown lignite led to the formation of a big mining lake (8.76 km² surface and up to 206 m depth). The main objective of this study is the analysis of changes in phytoplankton communities and trophic status, in order to assess water quality overlooking the adaptation in its recreational and sporting use and obtaining a sustainable ecosystem. Samples were collected from 2009 to 2014 for evaluation of its ecological potential within the framework of the implementation of the Water Framework Directive (WFD) in Galicia.

We have identified a total of 126 taxa: 22 Cyanophyta, 47 Heterokontophyta of which 42 are Bacillariophyceae, 3 Chrysophyceae, 1 Xantophyceae y 1 Synurophyceae, 6 Dinophyta, 2 Cryptophyta, 4 Euglenophyta, 14 Charophyta and 31 Chlorophyta. None of them is recognized as toxic, although it has been detected a high concentration of cysts that we have associated with *Mallomonas* sp., found at the end of August 2013. The current lake trophic state corresponds to a situation of oligotrophy, resulting in a decrease in phytoplankton biomass and productivity factors throughout the sampling period. According to the qualitative and quantitative composition of phytoplankton and the variables that define the trophic status, we can conclude that the lake is in good ecological conditions, according to the WFD criteria.

Keywords: As Pontes, WFD, Spain, trophic state, phytoplankton, artificial lake.

INTRODUCCIÓN

Los lagos mineros son el resultado del llenado de los pozos de las explotaciones mineras a cielo abierto por el aumento de las aguas subterráneas y, además, por el agua de las corrientes superficiales después del cese de las operaciones. El lago de As Pontes ocupa el hueco de lo que fue el mayor yacimiento carbonífero a cielo abierto de España desde 1976 hasta 2007. Dentro del Plan de Restauración de Endesa, se diseñó un lago artificial en el hueco dejado por la mina una vez abandonada la actividad, convirtiéndose en el más profundo y con mayor volumen de España.

En diciembre de 2000, la Directiva Europea Marco del Agua (a partir de ahora DMA, DIRECTIVA, 2000/60/CE) fue aceptada por los estados miembros de la UE como de obligado cumplimiento. Su aplicación, requiere que las autoridades ambientales evalúen el estado de las masas de agua muy modificadas en términos de buen potencial ecológico. En este caso, solo se admiten ligeras variaciones de los indicadores biológicos de calidad en comparación con los que representan el óptimo potencial ecológico. Consecuentemente, la DMA estableció la necesidad de la puesta en marcha de programas de control que permitieran el seguimiento del estado o del potencial ecológico de las masas de agua en cada demarcación hidrográfica (ECOSTAT, 2003). Entre esos elementos se incluye la composición, abundancia y biomasa

del fitoplancton, siendo por tanto adecuado para la detección y seguimiento de las presiones fisicoquímicas relacionadas con la contaminación térmica, con los cambios en la mineralización del agua, la eutrofización (concentraciones de nitrógeno y fósforo, y en ocasiones de sílice y otros cationes como el hierro) y la contaminación orgánica.

El fitoplancton juega un papel central en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas de agua dulce (DODSON *et al.*, 2009). Algas y cianobacterias son importantes componentes de la producción primaria y pueden ejercer una fuerte influencia sobre los otros componentes del ecosistema (por ejemplo, zooplancton, macrófitos y macroinvertebrados). La calidad y cantidad del fitoplancton dependen en parte de la carga de nutrientes. Por lo tanto el uso de fitoplancton para la evaluación de la calidad del agua (especialmente la evaluación del posible impacto de la eutrofización) tiene una larga historia (CARLSON, 1977). Algunos métodos utilizan la abundancia de fitoplancton (típicamente como clorofila *a*), mientras que otros examinan la estructura de la comunidad fitoplanctónica (especies dominantes e indicadoras) (HEINONEN, 1980; BRETTUM & ANDERSEN, 2005; REYNOLDS, 2006; REYNOLDS *et al.*, 2002). En la DMA el fitoplancton es uno de los cuatro elementos biológicos de calidad que se requieren para la evaluación ecológica del estado

de las aguas superficiales. De acuerdo con dicha normativa, se debe incluir información sobre la composición y abundancia de las especies o la biomasa, y la frecuencia e intensidad de las floraciones de fitoplancton. Además, la concentración de clorofila *a*, de fósforo total y la transparencia del agua medida con el disco de Secchi, son necesarias para valorar el estado trófico de las masas de agua mediante el índice de Carlson (CARLSON, 1977).

El principal objetivo del presente estudio es el análisis de la variación en la calidad del agua y las comunidades fitoplanctónicas del lago artificial de As Pontes, durante seis años (2009-2014). Recientemente se han hecho numerosos intentos para desarrollar los parámetros de estudio de fitoplancton, especies indicadoras y sus valores en el contexto de la DMA, sin embargo, en el caso de lagos artificiales, los documentos disponibles son todavía limitados. En este trabajo, a partir de datos limnológicos obtenidos desde el inicio de la restauración de la mina de As Pontes, se pretenden analizar los cambios en la comunidad de fitoplancton en diferentes momentos de su ciclo anual, así como las posibles especies indicadoras del estado trófico durante el período de estudio para la valoración del potencial ecológico.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

El lago artificial de As Pontes se localiza en el norte de la provincia de A Coruña a una altura de 332 m.s.n.m y ocupa el hueco dejado tras el cese de las operaciones mineras (Fig. 1). La mina de As Pontes es, desde 1976, el mayor yacimiento carbonífero a cielo abierto de España, de donde se extrajo lignito pardo hasta 2007, año en que finalizó dicha extracción por agotamiento del recurso (ARÉCHAGA *et al.* 2011). Dentro del Plan de Restauración de Endesa, se diseñó un lago artificial cuyo llenado comenzó en 2008 con aportes procedentes del río Eume, lluvia y agua de escorrentía de la denominada escombrera exterior, zona en donde se vertieron los estériles de la mina y las cenizas de combustión de la central térmica hasta el año 2002. Está considerado como uno de

los mejores ejemplos de restauración de espacios mineros del mundo.

En abril de 2012 se produjo el rebose del lago hacia el río Eume, momento en el que se incorporan las aguas del arroyo Meidelo, del río Illade y la clausura de la captación de las aguas del río Eume.

Actualmente el paisaje está dominado por un lago de más de 547 hectómetros cúbicos de capacidad y una zona de ocio de 40000 m² en donde se ubica una playa artificial de 450 m. El lago tiene 5,5 km de longitud y 206 m de profundidad máxima (150 m de profundidad media), con una superficie de 876 ha. Es en la actualidad, el mayor lago artificial de España (5 veces mayor y 6 veces más profundo que el lago natural de Sanabria). La presa de Alqueva, que está entre Portugal y España, es el lago artificial más grande de Europa.

El relieve de la zona es montañoso. Todo el municipio está por encima de los 300 m siendo la altitud media superior a los 450 m. La elevación máxima es de 756 m.s.n.m. (monte Caxado). Esta fuerte orografía se suaviza escalonadamente hacia los valles de los ríos Mera, Sor y Eume. El clima de As Pontes se caracteriza por la elevada precipitación anual (1684 mm) y temperaturas moderadas (media de 11.6°C). El mes de diciembre es el más lluvioso, pudiendo producirse en enero y febrero heladas y precipitaciones en forma de nieve.

En la escombrera exterior coexisten zonas de pradera, matorral, charcas y masas boscosas repobladas con *Pinus pinaster*, *P. radiata*, *Pseudotsuga douglasii*, *Castanea sativa*, *Alnus glutinosa*, diversas especies de *Betula*, *Acer*, *Sorbus* y *Quercus*, estando inventariadas un total de 217 especies vegetales (ARÉCHAGA *et al.* 2011).



Figura 1. Mapa de localización del lago y puntos de muestreo.
Figure 1. Location map of the lake and sampling points.

Muestreos

Los muestreos se realizaron, en los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre, desde 2009

al 2014 coincidiendo con las condiciones más representativas de la columna de agua en cada estación. Se muestrearon los puntos más profundos de cada cubeta del lago, que fueron designados como PVO, el situado al oeste y PVE el ubicado al este (Fig. 1), en cada uno de ellos se midió la profundidad del disco de Secchi, y se realizaron perfiles de la columna de agua con lecturas *in situ* de temperatura, pH, conductividad, potencial redox y oxígeno disuelto, cada 10 m, mediante una sonda multiparamétrica YSI 6600/V2 hasta enero de 2014 y una sonda YSI EXO 1 de nueva generación durante el resto del año.

Para la determinación de la concentración de nutrientes a la largo de dicha columna, se tomaron muestras en cinco profundidades con una botella tipo Van Dorm, en las que se determinaron la concentración de fósforo total: una muestra en superficie (de 0 a 7 m), una muestra justo encima y otra justo debajo de la termoclina, una muestra al doble de la profundidad de la termoclina y otra a máxima profundidad, justo encima del sedimento. El cálculo del fósforo total se realizó según la Norma UNE-EN ISO 6878 (2005).

Para la determinación de la clorofila *a* se tomaron muestras integradas (desde la superficie a una profundidad definida por 2,5 veces la visibilidad del disco de Secchi observada en ese momento) en cada punto de muestreo. Se tomó un volumen mínimo de 500 ml, que se mantuvo bajo refrigeración hasta el momento del análisis. La extracción y determinación de clorofila se realizó siguiendo el protocolo basado en *Standard Methods* 10200 H (APHA, 1998). El cálculo de la concentración de clorofila *a* se realizó mediante la fórmula tricromática de JEFFREY & HUMPHREY (1975).

Las muestras de fitoplancton se analizaron cualitativamente durante todo el período estudio y cuantitativamente desde noviembre de 2011 a 2014. Las muestras para el estudio cualitativo del fitoplancton se tomaron en agua superficial en ambos puntos de muestreo (PVO y PVE), mediante una red de 20 μm de luz de malla con sistema de apertura y cierre en la parte inferior. Se recogió 1 litro de agua filtrada entre 1 y 15 m de profundidad. Para el estudio cuantitativo del fitoplancton, se recogió el agua mediante un tubo de plástico flexible de 20 mm de diámetro lastrado en unos de sus extremos. El agua se introdujo en botellas de plástico,

se añadió lugol (1%) y se mantuvo en frío hasta su llegada al laboratorio. Debido a la proximidad de los puntos PVE y PVO en el lago, se decidió realizar una media de la presencia y abundancia del fitoplancton de ambos puntos y reflejarlo en las tablas como un único punto de muestreo.

Las muestras se obtuvieron trimestralmente durante el período del estudio (2009-2014), a cada metro de profundidad hasta alcanzar el límite de la capa fótica (2,5 veces la profundidad del visibilidad del disco de Secchi, entre 20 y 30 m). Inmediatamente después de la toma, las muestras se almacenaron en neveras portátiles con acumuladores de frío para garantizar su refrigeración hasta la recepción en laboratorio. Las muestras fueron recogidas y procesadas por personal técnico del laboratorio Applus Norcontrol S.L.U. acompañado por personal de Endesa, en cumplimiento con el Sistema de Gestión de Calidad del citado laboratorio (Endesa Generación, 2009-2014).

El estudio cuantitativo del fitoplancton se realizó trimestralmente, desde noviembre de 2012 hasta el 2014. El recuento se realizó usando la técnica de Utermöhl (UTERMÖHL, 1958) con columnas de sedimentación de 50 ml. El recuento de los organismos de cada muestreo y para cada punto del lago se llevó a cabo utilizando un microscopio invertido Nikon Diaphot TMD con el que se realizaron 100 campos a 400 aumentos. Para el estudio taxonómico se utilizó un microscopio óptico Olympus BX61 con contraste interferencial Nomarski equipado para la toma de imágenes digitales. Para el estudio de los cistes de *Mallomonas* fue necesaria su observación en el microscopio electrónico de barrido. La metodología utilizada fue la estándar, la muestra se pasó por filtros de 2 μm de diámetro de poro, que se secaron y sometieron al vacío, tras lo cual se les dio un baño de polvo de oro para su observación (IOC, 2010). La identificación taxonómica del fitoplancton se realizó mediante el apoyo de las siguientes claves y monografías: FÖRSTER (1982), GEITLER (1930-1932), HINDÁK (2008), HUBER-PESTALOZZI (1941), HUSTEDT (1930), JOHN *et al.* (2002), KOMÁREK & ANAGNOSTIDIS (1999, 2005), KOMÁREK & FOTT (1983), KOMÁREK (2013), KRISTIANSEN & PREISIG (2001), KRISTIANSEN (2005), MARGALEF (1948, 1955, 1956, 1983) y MARGALEF *et al.* (1976).

Tabla 2. (Continuación)

	2009			2010			2011			2012			2013			2014			ABUNDANCIA (cels/ml)							
	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V		O						
HETEROKONTOPHYTA: Bacillariophyceae																										
<i>Cyclotella</i> sp.																				125,5	429,2					
<i>Navicula</i> sp.	+				+	+			1,1				1,1	3,2			4,3	9		32	10,6	61,33				
<i>Fragilaria</i> sp.1		+	+	+	+	+	+	+	9,8	14,6	4,4	1,1			7,7	7	1			7,4		1,8	54,8			
<i>Fragilaria crotonensis</i> Kitton			+	+	+	+	+	+	0,38						15,5		7,5	2,8	5,4	17,9			49,48			
<i>Cyclotella stelligera</i> Cleve & Grunow									13,9	+													48,44			
<i>Cyclotella atomus</i> Hustedt																							46,4			
<i>Melosira</i> sp.				+																4	16,7	+	20,7			
<i>Aulacoseira</i> sp.				+	+		+										11						9,3	20,3		
<i>Ulnaria ulna</i> (Nitzsch) P.Compère	+	+	+		+	+	+						+	4,7				1,3	1,4	2,7	9,2	+	+	19,3		
<i>Fragilaria capucina</i> Desmazières							+											8	7,1	1,4				16,5		
<i>Achnanthes</i> sp.	+			+	+				0,25	+	+	+			7,8				2					10,05		
<i>Fragilaria</i> sp.2					+	+				+									9,3					9,3		
<i>Tabellaria fenestrata</i> (Lyngbye) Kützing															5,8							2,4		8,2		
<i>Nitzschia</i> sp.				+		+	+	+	+				+	0,2						3,3	4			7,5		
<i>Asterionella formosa</i> Hassall																						5,4		5,4		
<i>Nitzschia sigmoidea</i> (Nitzsch) W.Smith																				2,4				2,4		
<i>Stauroneis</i> sp.																					1,3			1,3		
<i>Eunotia</i> sp.						+								0,6										0,6		
<i>Tabellaria flocculosa</i> (Roth) Kützing								+						0,1	0,1	0,2						+	+	0,4		
<i>Surirella</i> sp.					+		+		0,25															0,25		
<i>Denticula</i> sp.																								0,2		
<i>Diatoma moniliformis</i> Kützing																								0,2		
<i>Nitzschia lorenziana</i> Grunow																								0,2		
<i>Tabellaria</i> sp.				+	+	+	+																	+		
<i>Asterionella</i> sp.				+	+																			+		
<i>Tabellaria ventricosa</i> Kützing				+																				+		
<i>Gomphonema</i> sp.				+																				+		
<i>Pinnularia</i> sp.				+		+																		+		
<i>Asterionella ralfsii</i> W.Smith						+																		+		
<i>Aulacoseira ambigua</i> (Grunow) Simonsen						+																		+		
<i>Achnantheidum</i> sp.						+			+															+		
<i>Ulnaria</i> sp.						+																		+		
<i>Encyonema</i> sp.						+								+										+		
<i>Cocconeis</i> sp.							+																	+		
<i>Frustulia</i> sp.								+																+		
<i>Nitzschia acula</i> (Kützing) Hantzsch									+															+		
<i>Cymbella</i> sp.								+																+		
<i>Brachysira</i> sp.										+														+		
<i>Fragilaria construens</i> (Ehrenberg) Grunow																								+		
<i>Nitzschia amphibia</i> Grunow																								+		
<i>Stephanodiscus</i> sp.																								+		
ABUNDANCIA (cels/ml)									25,8	14,6	6,2	4,4	160,2	37	38,5	188	97,1	61,8	41,2				137,9	812,5		
HETEROKONTOPHYTA: Chrysophyceae																										
<i>Dinobryon divergens</i> O.E.Imhof	+	+	+			+	+	+	12,9											25,5	23,8	5,1	57,3	93	56,6	359,76
<i>Kephyrion ovale</i> (Lackey) Huber-Pestalozzi																								+	174,2	
<i>Dinobryon cylindricum</i> O.E.Imhof										2,3	20	+													31,9	
ABUNDANCIA (cels/ml)									12,9	2,3	116,8	81,2	4,3		34,3	25,5	23,8	5,1	110	93	56,6				565,86	
HETEROKONTOPHYTA: Synurophyceae																										
<i>Mallomonas</i> sp.																									204	
ABUNDANCIA (cels/ml)																									204	
HETEROKONTOPHYTA: Xanthophyceae																										
<i>Tribonema</i> sp.																									4,8	
ABUNDANCIA (cels/ml)																									4,8	
EUGLENOPHYTA																										
<i>Trachelomonas volvocina</i> (Ehrenberg) Ehrenberg																									3,9	
<i>Lepocinclis ovum</i> (Ehrenberg) Lemmermann	+	+	+		+	+	+																		+	
<i>Trachelomonas</i> sp.							+																		+	
<i>Trachelomonas pusilla</i> Playfair												+													+	
ABUNDANCIA (cels/ml)																									3,9	
CRYPTOPHYTA																										
<i>Cryptomonas</i> sp.								+	10,3	1,3					0,1	3,2									14,93	
<i>Rhodomonas lacustris</i> Pascher & Ruttner										+	4,8					3,5									8,3	
ABUNDANCIA (cels/ml)									10,3	1,3	4,8				0,1	6,7									23,23	
DINOPHYTA																										
<i>Peridinium</i> sp.1	+	+			+	+	+	+	2,1	1,4	8,8	9,3	2,2	7			1,3	2,7	3	13,8	22				73,1	
<i>Peridinium cinctum</i> (O.F.Müller) Ehrenberg																									21,3	
<i>Peridinium</i> sp.2																									18,3	
<i>Peridinium umbonatum</i> Stein						+																			6,1	
<i>Peridinium volzii</i> Lemmermann																									+	
<i>Peridinium gatunense</i> Nygaard																									+	
ABUNDANCIA (cels/ml)									2,1	1,4	8,8	9,3	2,2	7	21,3	1,3	2,7	3	32,1	22	6,1				119,3	

Tabla 2. (Continuación)

	2009				2010				2011				2012				2013				2014				ABUNDANCIA (cel/ml)		
	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I			
CHLOROPHYTA																											
<i>Hariotina reticulata</i> P.A.Dangeard													55,3	6,9	0,5												62,7
Chlorococcales	+				+	+	+	+	+	+		18,2	1,5	24,3		10,2		3									57,2
<i>Kirchneriella</i> sp.												0,4		5,2		14,3							13,7				33,6
<i>Dictyosphaerium tetrachotomum</i> Printz													30,4														30,4
<i>Pediastrum boryanum</i> (Turpin) Meneghini												18,4			+												18,4
<i>Sphaerocystis</i> sp.					+		+		+	+	+								4,2	13,3						+	17,5
<i>Ankistrodesmus acicularis</i> (Braun) Korshikov																		2,8							+	13,9	16,7
<i>Chlorella</i> sp.	+						+	+									1,8							9,2	+		11
<i>Ulothrix tenerima</i> (Kützing) Kützing												+				10,4											10,4
<i>Oocystis borgei</i> J.W.Snow																		4,2						4,6	+		8,8
<i>Scenedesmus</i> sp.											+	3,27			0,1			1									4,37
<i>Scenedesmus quadricauda</i> (Turpin) Brébisson													4														4
<i>Palmella</i> sp.																			1,4								1,4
<i>Monoraphidium</i> sp.																			1,4								1,4
<i>Gloeocystis ampla</i> (Kützing) Rabenhorst																			1,3								1,3
<i>Tetraedron minutissimum</i> Korshikov												0,5			0,6												1,1
<i>Scenedesmus brevispina</i> (G.M.Smith) R.Chodat												+			0,1												0,1
Chlorosarcinales							+	+	+	+	+																+
<i>Scenedesmus communis</i> E.Hegewald							+	+																			+
<i>Coenochloris fottii</i> (Hindák) Tsarenko							+																			+	+
<i>Crucigenia</i> sp.							+																			+	+
<i>Asterococcus superbus</i> (Cienkowski) Scherffel							+																				+
<i>Ulothrix</i> sp.								+																			+
<i>Chaetophora</i> sp.									+																		+
<i>Pandorina</i> sp.									+	+																	+
<i>Chlamydomonas</i> sp.										+																	+
<i>Golenkinia radiata</i> Chodat										+	+																+
<i>Scenedesmus ecornis</i> var. <i>disciformis</i> (Chodat) Chodat																											+
<i>Scenedesmus aculeolatus</i> Reinsch																											+
<i>Gloeocystis vesiculosa</i> Nägeli																											+
ABUNDANCIA (cel/ml)												3,77	18,6	109,6	37	0,7	34,9	4,6	16,5	13,3				27,5	13,9		280,37
CHAROPHYTA																											
<i>Staurastrum</i> sp.1																											35,56
<i>Cosmarium</i> sp.	+											8,56		0,1	0,1	0,1	12,5	2,2	5,7	2,7	3,6	+	+	+		11	
<i>Cosmarium humile</i> Nordstedt ex De Toni																			1,1								1,1
<i>Cosmarium punctulatum</i> Brébisson																											0,6
<i>Staurastrum planctonicum</i> Telling																			0,3								0,3
<i>Staurastrum tohopekaligense</i> Wolle																											+
<i>Microspora abbreviata</i> (Rabenhorst) Lagerheim																											+
<i>Staurastrum cingulum</i> (West & G.S.West) G.M.Smith																											+
<i>Staurastrum</i> sp.2																											+
<i>Microspora</i> sp.																											+
<i>Elakatothrix</i> sp.																											+
<i>Klebsormidium</i> sp.																											+
<i>Staurodesmus</i> sp.																											+
<i>Spirogyra</i> sp.																											+
<i>Closterium</i> sp.																											+
<i>Cosmarium contractum</i> var. <i>ellipsoideum</i> (Eifving) West & G.S.West																											+
ABUNDANCIA (cel/ml)												8,56	0,7	0,5	0,1	12,5	3,3	7	5,4	3,6	6,9					48,56	

La gran abundancia de cianofíceas (Fig. 2) como *Aphanocapsa* sp. y *Merismopedia tenuissima* estaría relacionada con la elevada concentración de fósforo detectada en marzo de 2012, y probablemente corresponden a la proliferación primaveral de fitoplancton, característica de lagos y embalses. *Merismopedia tenuissima* es una especie indicadora de lagos ultraoligotróficos-oligotróficos (BRETUM & ANDERSEN, 2005). *Synechocystis* sp. es la tercera cianobacteria planctónica más abundante y se caracteriza porque aparece únicamente en otoño y sólo en el muestreo de 2014, probablemente ligada a un déficit de nitrógeno. En general, antes de 2011 se encuentran taxones planctónicos y bentónicos en el lago como consecuencia del llenado a partir del agua desviada principalmente del río Eume. Entre estas últimas podemos destacar *Calothrix*, *Lyngbya* y *Leptolyngbya*, pero a partir de 2012 predominan claramente las especies planctónicas.

En cuanto a las diatomeas (Fig. 3-4), aunque su mayor abundancia corresponde a las formas planctónicas (622,72 cel/ml), la abundancia de las bentónicas (189,73 cel/ml) se explica por los aportes de agua de los diversos cauces al lago, desde 2009

a 2011. Así, especies de los géneros *Cocconeis*, *Eunotia*, *Encyonema*, *Frustulia*, *Gomphonema*, *Pinnularia* o *Surirella*, consideradas bentónicas, no se encuentran a partir de 2012. Del total de 44 diatomeas encontradas, 21 taxones aparecen únicamente durante el período de llenado hasta 2012 y desaparecen posteriormente. La presencia de diatomeas planctónicas como *Cyclotella* spp. así como *C. stelligera* y *C. atomus*, se produce cuando el lago está casi lleno a finales de 2011, pero nunca anteriormente, siendo la diatomea más abundante a partir de 2012 en los muestreos realizados en otoño y verano de 2013. Otras diatomeas planctónicas como *Melosira* y *Aulacoseira* están presentes en casi todos los muestreos desde el comienzo del estudio pero son más abundantes a partir de la época en que se produce el rebose del lago en abril del 2012. Diatomeas bentónicas como *Navicula*, propias de aguas lénticas e incorporadas durante el llenado a partir del río Eume, son más abundantes en los muestreos de primavera a partir de 2012 momento en el que el lago comienza a recibir aportes de los ríos Illade y Meidelo.

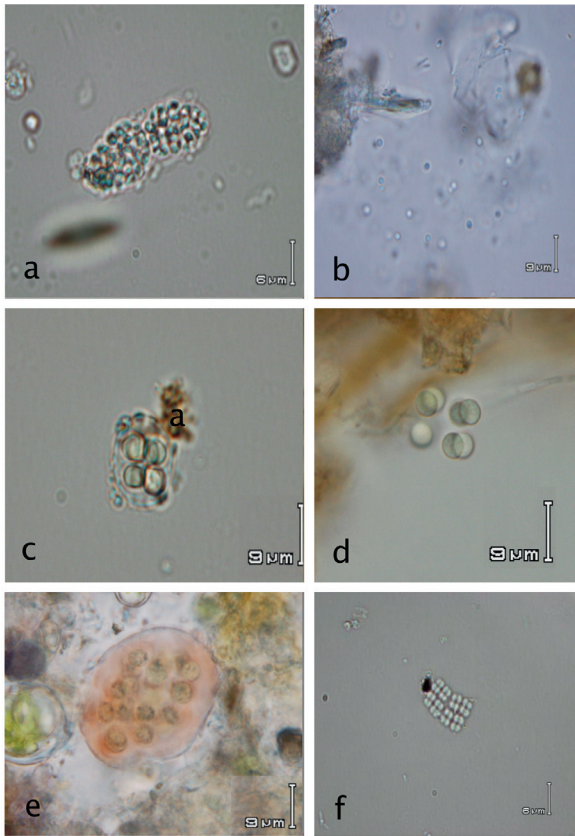


Figura 2. Cyanophyta. a: *Aphanocapsa nubila*. b: *A. delicatissima*. c: *Chroococcus* sp. d: *Eucapsis* sp. e: *Gloeocapsa* sp. f: *Merismopedia tenuissima*.

Figure 2. Cyanophyta. a: *Aphanocapsa nubila*. b: *A. delicatissima*. c: *Chroococcus* sp. d: *Eucapsis* sp. e: *Gloeocapsa* sp. f: *Merismopedia tenuissima*.

Las diatomeas *Fragilaria crotonensis*, *Fragilaria* sp. y *Ulnaria ulna* aparecen en cualquier época del año aunque solo la primera es planctónica. *Nitzschia* spp. es poco abundante pero aparece casi siempre en verano y otoño. *Tabellaria* spp. también son poco abundantes y aparecen en cualquier época del año. Destaca la presencia de ciertas especies que pueden utilizarse como indicadores del estado trófico del lago. *Cyclotella* spp. son las diatomeas planctónicas más abundantes en el lago, sobre todo en otoño. En nuestro caso, hemos podido identificar a *C. stelligera* y *C. atomus*.

Tabellaria flocculosa, característica de lagos mesotróficos está presente en As Pontes aunque con una abundancia media muy baja, 0,4 cels/ml en la totalidad de los 6 años de muestreo. La dinámica de los diferentes taxones de diatomeas tiene que

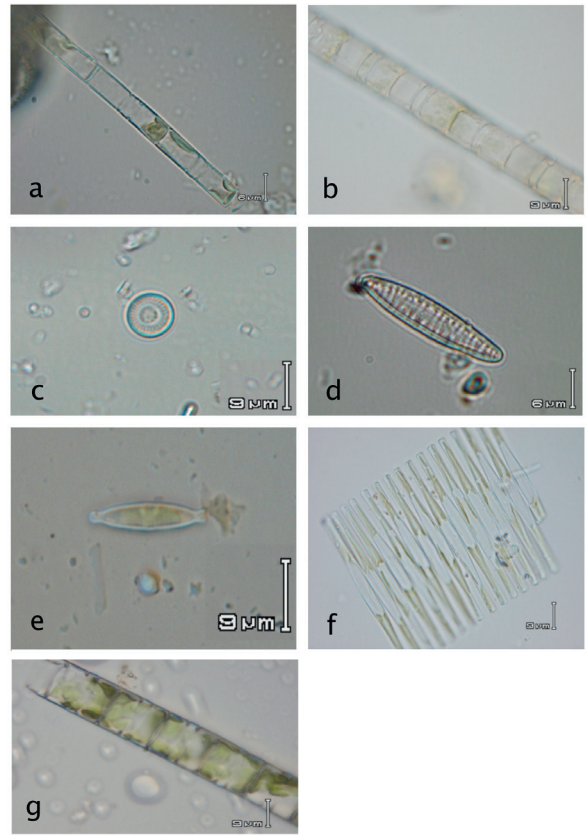


Figura 3. Bacillariophyceae. a: *Aulacoseira ambigua*. b: *Aulacoseira* sp. c: *Cyclotella stelligera*. d: *Diatoma moniliformis*. e: *Fragilaria capucina*. f: *F. crotonensis*. g: *Melosira* sp.

Figure 3. Bacillariophyceae. a: *Aulacoseira ambigua*. b: *Aulacoseira* sp. c: *Cyclotella stelligera*. d: *Diatoma moniliformis*. e: *Fragilaria capucina*. f: *F. crotonensis*. g: *Melosira* sp.

relacionarse con la hidrodinámica de las aguas del lago, y con las concentraciones de silicato, en este sentido es importante la necesidad específica de este nutriente para cada taxon, que puede servir para explicar el ciclo de estas algas en el lago y la sustitución de especies a lo largo del tiempo (MARGALEF, 1983).

Dentro de las crisofíceas (Figuras 4e-f), *Dinobryon divergens* se encuentra presente en casi todos los muestreos realizados aunque es más abundante en verano y otoño, mientras que *Kephyrion ovale* aparece siempre en primavera y solo a partir del reboso. La mayoría de las crisofíceas prefieren aguas oligomesotróficas y ligeramente ácido-alcalinas. *D. divergens* predomina en lagos que van desde oligotróficos a mesotróficos (BRETTUM & ANDERSEN, 2005), condiciones que prevalecen

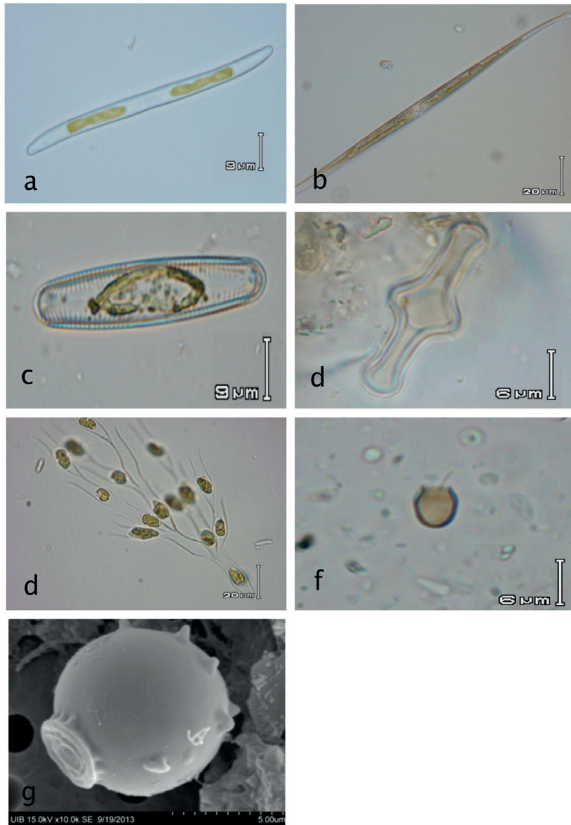


Figura 4. Bacillariophyceae. a: *Nitzschia acula*. b: *N. lorenziana*. c: *Pinnularia* sp. d: *Tabellaria ventricosa*. Chrysophyceae. e: *Dinobryon divergens*. f: *Kephyrion ovale*. Synurophyceae. g: ciste de *Mallomonas* sp.

en el lago de As Pontes. Las crisofíceas en general y el género *Dinobryon* en particular, se relacionan con aguas oligotróficas debido a la falta de fósforo, a pesar de que en condiciones ácidas el fosfato es más soluble (MARGALEF, 1983).

La sinurofícea *Mallomonas* sp. (Figura 4g), aparece sólo en el verano (agosto) detectándose una gran proliferación de cistes en el muestreo de 2013. Varias especies de este género se encuentran asociadas en su mayoría a aguas oligomesotróficas o mesotróficas (BRETTUM & ANDERSEN, 2005).

En cuanto a los dinoflagelados, *Peridinium* spp. aparecen en casi todos los muestreos del año siendo muy poco abundantes a lo largo del período de estudio. Únicamente destacan en primavera de 2013 con una abundancia de 21,3 cels/ml y en 2014 con 32,1 cels/ml. *Peridinium* es característica del

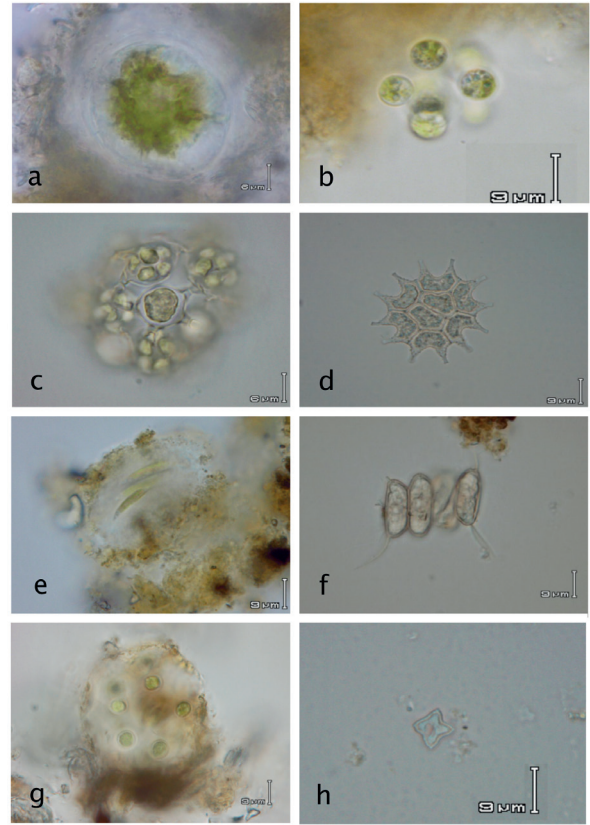


Figura 5. Chlorophyta. a: *Asterococcus superbus*. b: *Chlorococcum* sp. c: *Harotinia reticulata*. d: *Pedastrum boryanum*. e: *Quadrigula* sp. f: *Scenedesmus quadricauda*. g: *Sphaerocystis* sp. h: *Tetraedron minutissimum*.

fitoplancton durante la estratificación en verano (REYNOLDS, 1984). En general, criptófitas y euglenófitas son poco abundantes en el lago.

En cuanto a las clorófitas (Figura 5), *Harotinia reticulata* es la más abundante aunque solo aparece en 2012. Le siguen en abundancia distintas Chlorococcales, *Kirchneriella* sp., *Dictyosphaerium tetrachotomum* y *Pedastrum boryanum*, la mayoría de ellas coloniales.

Dentro de las carófitas (Figura 6a-d), la más común y más abundante es *Staurastrum* sp1., encontrándose en casi todas las épocas del año desde 2009 al 2014. *Staurastrum* spp. aparecen en cualquier época del año, mientras que *Cosmarium* sp. se encuentra en primavera y verano y *Sphaerocystis* sp., en otoño. Algunos grupos de algas como las desmidiáceas responden positivamente a

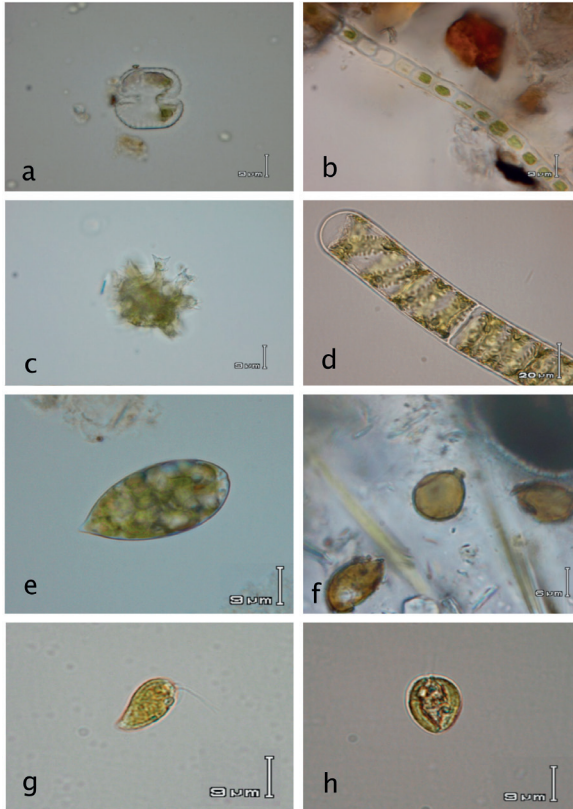


Figura 6. Charophyta. a: *Cosmarium dentiferum*. b: *Microspora* sp. c: *Staurastrum tohopekalihense*. d: *Spirogyra* sp. Euglenophyta. e: *Lepocinclis ovum*. f: *Trachelomonas* sp. Cryptophyta. g: *Cryptomonas* sp. h: *Rhodomonas lacustris*.
Figure 6. Charophyta. a: *Cosmarium dentiferum*. b: *Microspora* sp. c: *Staurastrum tohopekalihense*. d: *Spirogyra* sp. Euglenophyta. e: *Lepocinclis ovum*. f: *Trachelomonas* sp. Cryptophyta. g: *Cryptomonas* sp. h: *Rhodomonas lacustris*.

la mezcla de la columna de agua durante el verano y esto está relacionado con su falta de movilidad, tamaño relativamente grande y a las características ácidas del agua (REYNOLDS, 1984).

Se encuentran muy pocas algas filamentosas en el lago, 3 carófitas (*Microspora* sp., *M. abbreviata* y *Klebsormidium* sp.) y 3 clorófitas (*Chaetophora* sp., *Ulothrix* sp. y *U. tenerrima*), estando presentes únicamente en 6 muestreos. Estas algas filamentosas bentónicas son frecuentes en el río Eume, y salvo *Ulothrix tenerrima* que aparece abundante en 2013, el resto solo se han encontrado en el lago antes de su total llenado.

Una vez completado el llenado del lago, el desarrollo de la biomasa algal y la secuencia de las poblaciones fitoplanctónicas están más directamente relacionados con el efecto de la variabilidad

estacional sobre las propiedades de la columna de agua y la disponibilidad de nutrientes, respondiendo al modelo de sucesión anual del fitoplancton esperable en lagos (MARGALEF, 1983).

Estado Trófico

Para el cálculo del estado trófico se ha tenido en cuenta la concentración de la clorofila *a*, el fósforo total y la transparencia del agua. En la Tabla 3 se resumen los valores de estos parámetros durante el período de muestreo (ENDESA GENERACIÓN S.A. 2009-2014).

Tabla 3. Concentración de clorofila *a*, fósforo total, transparencia del agua e índice trófico medio desde 2010 al 2014.
Table 3. Concentration of chlorophyll *a*, total phosphorus, water transparency and mean trophic index from 2010 to 2014.

	2010	2011	2012	2013	2014
Clorofila a (µg/L)	0,49	0,84	0,57	0,68	0,52
Fósforo total (µg/L)	3,36	9,35	12,39	2,9	7,62
Secchi (m)	3,33	4,74	5,93	7,03	7,17
TSI medio	29,2	33,23	30,79	25,02	29,98

La concentración de clorofila *a* presenta un valor medio anual máximo de 0,84 µg/L en 2011 y mínimo de 0,49 µg/L en 2010. Teniendo en cuenta estas bajas concentraciones, el lago de As Pontes se considera ultraoligotrófico (OECD, 1982). Por otra parte, la concentración de fósforo total es máxima en 2012 con un valor medio anual de 12,39 µg/L debido a la concentración de 34,4 µg/L de P total encontrada en marzo de ese año, indicando un estado mesotrófico. La concentración es mínima en 2013 con un valor de 2,9 µg/L indicando un estado ultraoligotrófico lo mismo que en 2010. Considerando los valores de 2011 y 2014 el lago es oligotrófico. Por último, la transparencia del agua, medida con el disco de Secchi, presenta un valor mínimo de 3,33 m que corresponden al año 2010. Su valor asciende hasta 7,17 m en 2014, correspondiendo con el paso de mesotrófico a oligotrófico, según la clasificación de la OECD.

Según los valores obtenidos del TSI medio, en 2010, 2013 y 2014 el lago es oligotrófico, y en 2011 y 2012 es mesotrófico. El estado trófico considera la media de los 3 parámetros anteriores (clorofila *a*, fósforo total y transparencia) y se observan valores anuales que oscilan en torno a 30 y por tanto el estado trófico también oscila entre oligotrófico y mesotrófico. A partir del llenado, los sedimentos de

los taludes que rodean al lago se van estabilizando poco a poco, repercutiendo también en un aumento de la transparencia del agua, de ahí que el estado trófico pase de mesotrófico a oligotrófico y es la tendencia de los dos últimos años, por tanto es de esperar que siga con las mismas condiciones o incluso mejores.

CONCLUSIONES

La evolución de las condiciones físicoquímicas del lago durante su desarrollo condicionaron la aparición y distribución de las distintas especies de fitoplancton durante la etapa de llenado, de mayo de 2009 a febrero de 2012, mientras que la variabilidad estacional ha sido el factor más influyente una vez que el lago alcanzó el total de su capacidad. Durante el desarrollo del lago se produjo un incremento notable en la diversidad del fitoplancton, siendo la mayor parte de las especies pioneras, propias de los sistemas fluviales que desembocan en el lago. Un efecto claro del llenado ha sido la proliferación de especies propiamente fitoplanctónicas.

El estudio de las muestras de fitoplancton revela el predominio de diatomeas y algas verdes en gran parte del año, aunque las cianofíceas no tóxicas han llegado a mantener abundancias relativamente importantes durante algunos periodos, dinámica que debemos asociar a los valores de la concentraciones de nitrógeno y fósforo y su relación atómica, en general el incremento de la misma favorece a las clorofíceas, mientras que su disminución es más favorable a las cianobacterias. En el caso de las diatomeas, también hay que tener presente las variaciones en la cantidad de silicato disponible para estas algas.

A partir del rebose producido en abril del 2012, los sedimentos de los taludes que rodean al lago se van estabilizando poco a poco, repercutiendo en una disminución de la concentración de fósforo total, que sumado al aumento de la transparencia del agua, el estado trófico del lago es al final del estudio oligotrófico. Esta es la tendencia de los dos últimos años, por tanto es de esperar que siga con las mismas condiciones o incluso, basándonos en las especies de algas presentes en el lago, aquellas podrían ser mejores.

AGRADECIMIENTOS

A Endesa por financiar y ceder los datos de los informes realizados durante estos años para este estudio. A l@s revisor@s anónim@s por sus sugerencias.

REFERENCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA) (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19 th Ed. Washington, USA. APHA, AWWA, WPCF. Inc., 1325 pp.
- ARÉCHAGA F., FERRERO, T., GIL, A., MENÉNDEZ, J.A. & VALLE, R. (2011). *Riqueza restaurada. Historia de la Mina de As Pontes*. ENDESA. 373 pp.
- BRETTUM, P. & ANDERSEN, T. (2005). The use of phytoplankton as indicators of water quality. *The Research Council of Norway*. Report nº 20032. Serial nº 4818-2004. 33 pp.
- CARLSON, R.E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22:361-369.
- DIRECTIVA 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 327: 1-72.
- DODSON, S.L., NEWMAN, A. L., WILL-WOLF, S. ALEXANDER, M. L., WOODFOR, M. P. & VAN EGEREN, S. (2009). The relationship between zooplankton community structure and lake characteristics in temperate lakes (Northern Wisconsin USA). *Journal of Plankton Research*, 31 (1): 93-100.
- ECOSTAT (2003). *Overall Approach to the Classification of Ecological Status and Ecological Potential*. Working group 2A, Ecological Status (ECOSTAT).
- ENDESA GENERACIÓN S.A. (2009). *Informes de seguimiento y análisis sobre la calidad del agua y estado trófico del lago minero de As Pontes (A Coruña)*. Informe Nº: 01-03/09. As Pontes (A Coruña), España.
- ENDESA GENERACIÓN S.A. (2010). *Informes de seguimiento y análisis sobre la calidad del agua y estado trófico del lago minero de As Pontes*

- (A Coruña). Informe N°: 01-04/10. As Pontes (A Coruña), España.
- ENDESA GENERACIÓN S.A. (2011). *Informes de seguimiento y análisis sobre la calidad del agua y estado trófico del lago minero de As Pontes (A Coruña)*. Informe N°: 01-04/11. As Pontes (A Coruña), España.
- ENDESA GENERACIÓN S.A. (2012). *Informes de seguimiento y análisis sobre la calidad del agua y estado trófico del lago minero de As Pontes (A Coruña)*. Informe N°: 01-04/12. As Pontes (A Coruña), España.
- ENDESA GENERACIÓN S.A. (2013). *Informes de seguimiento y análisis sobre la calidad del agua y estado trófico del lago minero de As Pontes (A Coruña)*. Informe N°: 01-04/13. As Pontes (A Coruña), España.
- ENDESA GENERACIÓN S.A. (2014). *Informes de seguimiento y análisis sobre la calidad del agua y estado trófico del lago minero de As Pontes (A Coruña)*. Informe N°: 01-04/14. As Pontes (A Coruña), España.
- FÖRSTER, K. (1982). Conjugatophyceae Zygnematales und Desmidiaceae (excl. Zygnemataceae). In: Huber-Pestalozzi, G. (Ed.), *Das Phytoplankton des Süßwassers* 8(1): 1-543. Schweizerbart'sch Verlagbuchhandlung, Stuttgart.
- GEITLER, L. (1930-1932). *Cyanophyceae*. In: Rabenhorst L. (Ed.). *Rabenhorst Kryptogamen Flora*, 14. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, 1196 pp.
- HEINONEN, P. (1980). *Quantity and composition of phytoplankton in Finnish inland waters*. Publication of the Water Research Institute 37. Vesihallitus-National Board of Waters Finland.
- HINDÁK, F. (2008). *Atlas of Cyanophytes*. Veda, Publishing House of the Slovak Academy of Sciences. Bratislava. 253 pp.
- HUBER-PESTALOZZI, G. (1941). *Das Phytoplankton des Süßwassers*. (Die Binnengewässer, Band XVI). Teil 2. (i) Chrysophyceen, Farblose Flagellaten. 365pp.
- HUSTEDT, F. (1930). *Die Süßwasser-Flora Mitteleuropas*. Heft 10: Bacillariophyta (Diatomaceae). Heterokonten. E. Schweizerbart'sche Verlagbuchhandlung, Stuttgart. Reprint 1976.-Otto Koeltz Science Publishers. Koenigstein.
- INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION OF UNESCO (IOC). (2010). *Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis*. Karlson, B., C. Cusack & E. Bresnan (Eds). UNESCO (IOC Manuals and Guide, No. 55) (IOC/2010/MG/55). Paris. 110 pp.
- JEFFREY, S. W., & HUMPHREY, G. F. (1975). New spectrophotometric equation for determining chlorophyll a, b, c1 and c2. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 167: 194-204.
- JOHN, D. M., B. A. WHITTON, A. J. BROOK. (2002). *The Freshwater Algal Flora of The British Isles. An Identification Guide to Freshwater and Terrestrial Algae*. The Natural History Museum. Cambridge University Press. Cambridge. 702pp.
- KOMÁREK, J. (2013). *Cyanoprokaryota. 3. Heterocytous genera*. In: Büdel B., Gärtner G., Krienitz L. & Schagerl M. (Eds.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa/Freshwater flora of Central Europe*, p. 1130, Springer Spektrum Berlin, Heidelberg.
- KOMÁREK, J. & ANAGNOSTIDIS, K. (1999). *Cyanophyta part I: Chroococcales*. In: Ettl, H.; Gärtner, J.; Heynig, H. & Mollenhauer, D. (Eds.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa* 19/1: 1-548. Gustav Fisher. Jena.
- KOMÁREK, J. & ANAGNOSTIDIS, K. (2005). *Cyanophyta part 2: Oscillatoriales*. In: Büdel, B., H.; Gärtner, J.; Krienitz, L., et Schagerl, M. (Eds.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa* 19/2: 1-759. Gustav Fisher. Jena.
- KOMÁREK, J. & FOTT, B. (1983). *Chlorophyceae (Grünalgen) Ordnung Chlorococcales*. In: Huber-Pestalozzi, G. (Eds.), *Das Phytoplankton des Süßwassers* 16(7/1): 1-1044. Schweizerbart'sch Verlagbuchhandlung. Stuttgart.
- KRISTIANSEN, J. (2005). *Golden algae*. 167 pp. A.R.G. Gantner Verlag K.G. Koenigstein.
- KRISTIANSEN, J. & PREISIG, H.R. (2001). *Encyclopedia of Chrysophyte Genera*. Bibliotheca Phycologica. Band 110. 260 pp. J. Cramer. Stuttgart.
- MARGALEF, R. (1948). Materiales para una flora de las algas de NE de España. II. Chrysophyceae, Heterocontae, Dinophyceae, Euglenineae. *Collectanea Botanica*, 2 (1): 100-130.
- MARGALEF, R. (1955). Comunidades bióticas de las aguas dulces del noroeste de España.

- Publicaciones del Instituto de Biología Aplicada*, 21: 5-85.
- MARGALEF, R. (1956). Algas de agua dulce del norte de España. *Publicaciones del Instituto de Biología Aplicada*, 22: 5-47.
- MARGALEF, R. (1983). *Limnología*. Ediciones Omega. Barcelona. 1010pp.
- MARGALEF, R., M. D. PLANAS, J. ARMENGOL, A. VIDAL, N. PRAT, A. GUISSSET, J. TOJA & ESTRADA, M. (1976). *Limnología de los embalses españoles*. Dirección General de Obras Hidráulicas. M.O.P. Publ. 123. Madrid.
- OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économiques). (1982). *Eutrophication des eaux. Méthodes de surveillance, d'évaluation et de lutte*. París. 164 p.
- REYNOLDS, C.S. (1984). *The Ecology of Freshwater Phytoplankton*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 384 pp.
- REYNOLDS, C. S. (2006). *Ecology of phytoplankton*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 552 pp.
- REYNOLDS, C. S., HUSZAR, V., KRUK, C., NESELLI-FLORES, L. & MELO, S. (2002). Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 24: 417-428.
- UNE-EN ISO 6878. (2005). *Water quality - Determination of phosphorus - Ammonium molybdate spectrometric method*.
- UTERMÖHL, H. (1958). Zur Vervollkommnung der quantitativen phytoplankton-methodik. *Mitteilung Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 9: 1-38.