

RESEARCH ARTICLE

Environmental recovery of As Pontes mine pit lake

Recuperación medioambiental del lago minero de As Pontes

Francisco Rivas¹, Javier Samper², Luis Montenegro²

¹ Ingeniero de Caminos. Director del Proyecto, Madrid, España.

² Centro Interdisciplinar de Química y Biología (CICA). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Coruña, 15071 A Coruña, España.

Corresponding author: Javier Samper Calvete (j.samper@udc.es)

ABSTRACT

Key points

Transformation of the As Pontes mine hole in a pit lake by using water from Eume river, surface runoff, groundwater and rainfall.

Perfect mix and stratified lake models were performed to simulate the final water chemical quality of the lake.

Calculated results of the overflow water quality are in line with the measured and comply with all the established limits.

One of the most common solutions for more than 50 years for the recovery of mine holes generated during mining activities is their transformation into lakes. This paper presents the activities carried out from the closure of the As Pontes mine to the total filling of the mining lake. The environmental solution adopted for the recovery of the mining hole and its transformation into a mining lake is described, as well as the methodology followed for its filling, defining the water sources used, its volume and its chemical quality. Perfect mix and stratified lake models were performed to simulate the final chemical quality of the lake. The details of the studies carried out on waves on the shores of the lake and the stability of the slopes of the mine are also presented. The hydraulic works carried out to reintegrate into the lake the watercourses that were diverted during the mining exploitation are also indicated. Water chemical data of the As Pontes lake collected during and after the filling of the lake show the presence of two well-differentiated zones separated by a chemocline. The uppermost layer has a slightly acid pH and oxic conditions, while the deeper layer has very low pH values and anoxic conditions. The methodology used was successful and the forecasts made are in line with the results obtained both in relation to the filling time of the lake and the quality of the overflow waters, which comply with all the established limits.

Keywords: Pit lake; As Pontes mine; Environmental recovery; Water quality.

Article History:

Received: 29/06/2022

Accepted: 04/05/2023

Puntos clave

Transformación del hueco minero de As Pontes en un lago utilizando agua del río Eume, escorrentía superficial, subterránea y de lluvia.

Utilización de modelos de mezcla perfecta y de lago estratificado para la simulación de la calidad química final del lago.

Los valores calculados de calidad química del agua de rebose del lago coinciden con los medidos y cumplen con los límites establecidos.

Una de las soluciones más comunes para la recuperación de los huecos de mina es su transformación en lagos. En este trabajo se presentan las actividades realizadas desde el cierre de la mina de As Pontes hasta el llenado total del hueco minero. Se describe la solución ambiental adoptada para la recuperación del hueco minero y su transformación en un lago minero, así como la metodología seguida para su llenado definiendo las fuentes de agua utilizadas, su volumen y su calidad química. Se realizaron modelos de mezcla perfecta y de lago estratificado para la simulación de la calidad química final del lago. Se presentan los estudios realizados sobre oleaje en las orillas del lago y la estabilidad de los taludes de la mina. Se indican también las obras hidráulicas realizadas para reintegrar al lago los cursos de agua que se desviaron durante la explotación minera. El control de la evolución de la calidad química de las aguas del lago de As Pontes realizado durante y después de la etapa de llenado confirmó que el lago presenta durante el llenado dos capas bien diferenciadas separadas por una quimiocline. La capa más superficial tiene pH ligeramente ácido y condiciones óxicas, mientras que la capa más profunda presenta pH muy bajo y condiciones anóxicas. La metodología empleada fue exitosa y las previsiones realizadas coinciden con los resultados obtenidos tanto en el tiempo de llenado del lago como en la calidad de las aguas de rebose que cumplen con los límites establecidos.

Palabras clave: Lago minero; Mina de As Pontes; Recuperación medioambiental; Calidad del agua.

Historial del artículo:

Recibido: 29/06/2022

Aceptado: 04/05/2023

1. Introducción

Una de las soluciones más comunes desde hace más de 50 años para la recuperación de las explotaciones mineras a cielo abierto o cortas mineras generadas durante las actividades extractivas es su transformación en lagos. A estos lagos artificiales se les denomina lagos mineros (*pit lakes*, en inglés), tanto si se forman por inundación controlada y planificada como por un llenado natural después del cese de las labores de bombeo y extracción de agua en la mina. El principal problema de esta solución medioambiental es la calidad química final del agua del lago y de sus descargas por rebose o por descargas subterráneas a las cuencas que lo rodean. Los lagos mineros se forman cuando se deja de drenar el agua del fondo de un hueco minero una vez finalizada la fase de explotación de una mina a cielo abierto ya que deja de ser necesario bajar el nivel freático de la mina para evitar la entrada del agua subterránea. El proceso de llenado del hueco con aguas superficiales y subterráneas se puede acelerar si se dispone de otras fuentes de agua natural procedentes de ríos cercanos.

McCullough y Vandenberg (2020) mencionan la relevancia del conocimiento tanto de la evolución a largo plazo de la calidad química de los lagos mineros como de sus características ecológicas para comprender y analizar tanto sus posibles riesgos como sus oportunidades de uso para las generaciones futuras. Estos autores sugieren la necesidad del estudio de los lagos mineros a diferentes escalas, desde experimentos de laboratorio en columnas de pocos cm hasta la escala real. Además, indican también la necesidad de utilizar los modelos numéricos para cuantificar los efectos de los procesos físicos, químicos y biológicos en los lagos ácidos mineros. Sánchez-España *et al.* (2020) indican que los lagos mineros son masas de agua singulares que presentan de forma simultánea: (1) Características geoquímicas y biológicas típicas del drenaje ácido de minas como valores bajos de pH y altas concentraciones de sulfato y metales disueltos, y (2) Procesos físicos, limnológicos e hidrológicos comunes en lagos naturales y embalses como la alternancia de una estratificación estacional y flujos verticales de solutos y sedimentos.

La recuperación ambiental de antiguos huecos mineros mediante su transformación en lagos mineros y el estudio de la calidad química de sus aguas se ha realizado en Europa, Estados Unidos

y Canadá desde 1990 (Miller *et al.*, 1996; Geller *et al.*, 1998; Eary, 1999; Geller *et al.*, 2013; McCullough and Schultze, 2018). En Eary (1999) se indica que la metodología para predecir la calidad química de un lago minero debe tener en cuenta la entrada de agua subterránea, la precipitación, la evaporación, la escorrentía superficial, el lavado de las paredes de la mina, los procesos biológicos, la hidrodinámica del lago y el equilibrio geoquímico entre las especies en disolución acuosa y las fases minerales. Este autor identifica las reacciones químicas necesarias para establecer los modelos geoquímicos que permiten interpretar los datos medidos en 24 lagos mineros en explotaciones mineras metálicas (fundamentalmente de la minería de Cu, Au y U) en Estados Unidos y Canadá, y en 66 lagos cuyo origen es la minería del carbón en Alemania. En Ramsted *et al.* (2003) se presenta el caso de un lago minero en Udden (Suecia) de 390 m de largo, 150 m de ancho y 50 m de profundidad. El llenado de la corta de esta mina de sulfuros se realizó en 2 años con agua subterránea, de lluvia y de escorrentía. Knöller *et al.* (2004) presentaron el caso del lago minero ML111 en Lusacia (Alemania) en una mina de lignito de 900 m de largo, 140 m de ancho y 10 m de profundidad. El llenado de la corta minera se realizó con agua subterránea y se completó en 1969. En Denimal *et al.* (2005) se estudió el llenado de dos lagos mineros, el St. Louis, con una profundidad máxima de 60 m y conectado con un acuífero y el Fouthiaux, con una profundidad media de 31 m y sin conexión con agua subterránea, situados en huecos generados en la minería del carbón en el Macizo Central en Francia. Las conclusiones que se extraen de estos trabajos son que: (1) Existe estratificación térmica y química (al menos de forma estacional) en todos los lagos mineros analizados, y (2) La calidad química del agua depende de las características propias de cada lago.

La transformación de la corta minera resultante de los más de 30 años de explotación de la mina de lignito de As Pontes (A Coruña) en un lago minero fue llevada a cabo por ENDESA Generación SA entre enero de 2008 y abril de 2012 mediante el llenado con 548 hm³ de agua del río Eume, de la escorrentía superficial de las escombreras exteriores, del agua subterránea de la mina y del agua de lluvia (Samper *et al.*, 2006; Medina *et al.*, 2017; Juncosa *et al.*, 2019). La creación del lago artificial de As Pontes constituyó una restauración ambiental extremadamente sin-

gular y compleja, no solo por las dimensiones del propio hueco sino también por el amplio programa de estudios, proyectos y actividades realizadas por diferentes equipos de trabajo para el acondicionamiento final del hueco minero. Es importante resaltar la relevancia de la actuación coordinada de especialistas en hidrología, química de aguas ácidas, medio ambiente, hidráulica, oleaje, geotecnia y otras materias asociadas a las anteriores para aportar una solución de éxito al problema de la recuperación medioambiental de antiguos espacios mineros una vez aprovechados los recursos naturales existentes en ellos.

En España existe otro lago minero en el hueco resultante de la explotación de la mina de lignito de Meirama (A Coruña). Se trata de una restauración ambiental similar a la del lago de As Pontes. El llenado de la corta minera de Meirama se realizó entre 2008 y 2017 con 146 hm³ de agua procedente principalmente de las aportaciones del río Barcés (Delgado *et al.*, 2014). Juncosa *et al.* (2018) estudiaron la evolución del proceso de llenado de estos dos lagos mineros y concluyeron que ambos presentaban una estratificación química permanente, clasificándose los dos lagos como meromíticos. Los dos lagos presentaban dos capas bien definidas separadas por una quimioclina. La más profunda (monimolimnion) presenta valores de pH muy bajos y condiciones anóxicas mientras que la capa más superficial (mixolimnion) tiene un pH ligeramente ácido y presenta oxígeno disuelto. También, existe otro lago minero en el norte de España en el hueco resultante de la explotación de Zn en la mina de Reocín (Cantabria). La actividad minera finalizó en 2003. El proceso de llenado del hueco por inundación natural comenzó en 2004 y todavía no ha finalizado (Barral *et al.*, 2021). Sánchez-España *et al.* (2008) estudiaron las características limnológicas e hidrogeoquímicas de 22 lagos mineros existentes en la Faja Pirítica Ibérica. La actividad minera en estas cortas cesó entre los años 1960 y 1990. Las cortas mineras se llenaron con los aportes de la lluvia y de las aguas subterráneas. La mina de Zn y Pb de Brunita en Murcia se abandonó en 1988 y en la corta minera se creó de forma natural un lago minero con una profundidad máxima de 22 m y una superficie de 45000 m² (Sánchez-España *et al.*, 2020).

El principal objetivo de este trabajo es presentar una síntesis de los estudios y actividades realizadas dentro del proyecto de recuperación medioambiental de la mina de As Pontes median-

te la creación de un lago artificial dentro de la corta minera. En el trabajo se indican los principales hitos y los aspectos limnológicos e hidrogeoquímicos más relevantes. Se destaca el interés y la contribución de los modelos numéricos realizados para la predicción de la calidad química del agua del lago minero. A diferencia de otros trabajos publicados sobre la mina de As Pontes, hay que destacar que este manuscrito presenta una visión global del planteamiento del problema, los métodos utilizados para dar respuesta a los retos, las soluciones adoptadas y los resultados alcanzados en lo que se puede calificar como un caso de éxito de recuperación medioambiental del hueco final de la mina de As Pontes. En este trabajo se presentan de forma resumida todas las etapas acontecidas desde el cierre de la mina de As Pontes hasta el llenado total de la corta minera. En primer lugar, se enumeran las características más relevantes de la mina de As Pontes y se describe la solución ambiental adoptada para la recuperación del hueco minero y su transformación en un lago minero, así como la metodología seguida para su llenado, definiendo las fuentes de agua utilizadas, su volumen y su calidad química. A continuación, se presentan los resultados de la simulación numérica de los posibles escenarios de llenado del lago para predecir la evolución de la calidad química del agua utilizando un modelo de mezcla perfecta y un modelo hidrodinámico y geoquímico de lago estratificado. A continuación, se describen los estudios de oleaje en las orillas del lago y de la estabilidad de los taludes de la mina. Después, se presenta el llenado del lago con especial énfasis en la calidad de sus aguas, el oleaje en sus orillas y la estabilidad de sus taludes. Se indican también las obras hidráulicas realizadas para reintegrar al lago los cursos de agua que se desviaron durante la explotación minera. El artículo finaliza con la descripción de la situación actual del lago y su entorno y las principales conclusiones del trabajo realizado.

2. Descripción de la mina de As Pontes

La mina de As Pontes estaba situada al noroeste de la provincia de A Coruña en el municipio de As Pontes de García Rodríguez (Figura 1). Se trata de un municipio con una extensión de 240.60 km² y una población de aproximadamente 10000 habitantes en 2020, la mayor parte asentados en su núcleo urbano. La actividad extractiva de lignito en la mina a cielo abierto de As



Figura 1. Mapa de situación de la zona de estudio (arriba) y fotografía de la mina de As Pontes (cortesía de Soledad Souto).
Figure 1. Map showing the location of the study area and aerial view of As Pontes mine (courtesy of Soledad Souto).

Pontes por parte de ENDESA comenzó en 1976 y finalizó en 2007, aunque los primeros indicios de labores mineras en la zona datan de 1943. La explotación de la mina estuvo siempre directamente relacionada con la operación de la central térmica de As Pontes, propiedad de ENDESA Generación S.A., que tenía 4 grupos con una potencia eléctrica cada uno de ellos de 350 MW (1400 MW en total). Desde la puesta en marcha de la central térmica en 1976 hasta 1993 la producción de lignito en la mina se mantuvo entre 10^7 y $1.2 \cdot 10^7$ t/año. La entrada en vigor el 1 de enero de 1993 de la Directiva Europea 88/609/CEE (CEE, 1988) con nuevos límites de emisiones atmosféricas para grandes instalaciones de combustión obligó a que entre 1993 y 1996 se transformasen los 4 grupos de la central térmica para poder utilizar una mezcla al 50% de lignito de la mina y de carbón de importación con bajo contenido en azufre. Por tanto, entre 1996 y 2004 la producción de lignito en la mina de As Pontes disminuyó hasta $6 \cdot 10^6$ t/año. Desde 2004 la producción de lignito continuó disminuyendo paulatinamente hasta su cierre definitivo el 28 de diciembre de 2007. En total se extrajeron $2.63 \cdot 10^8$ t de lignito y $6.97 \cdot 10^8$ m³ de material estéril, del que aproximadamente el 85% se apiló en las escombreras exteriores, que fueron restauradas entre 1984 y 2007, y el resto se almacenó en el interior de la mina (Medina *et al.*, 2017).

Al final de la fase de explotación de la mina el hueco minero tenía una superficie de 1200 ha, una longitud de 6 km, un ancho de 2.7 km y una profundidad máxima de 290 m. La Figura 1 muestra los dos huecos mineros (campo oeste y este) separados entre sí por una zona más elevada (umbral), así como la situación de las escombreras exteriores restauradas, la central térmica y el núcleo urbano de As Pontes. La explotación de la mina se realizó mediante el “método alemán”. El lignito se transportaba y almacenaba en los parques de carbón de la mina y de la central térmica de As Pontes, mientras que el estéril se enviaba a las escombreras exteriores.

3. Solución ambiental adoptada para la recuperación del hueco minero

La alta pluviometría de la zona de estudio y la disponibilidad de recursos hídricos en la época invernal facilitaron la recuperación ambiental del hueco minero de As Pontes ya que permitieron el llenado del hueco minero con agua superficial de buena calidad para convertirlo en un lago minero. Esta solución ya se había utilizado con éxito en muchas minas de lignito en Alemania, tanto en el distrito minero de Lausacia (Koch *et al.*, 2005; Krümmelbein *et al.*, 2012; Geller and Schultze, 2013; Schultze *et al.*, 2013; McCullough and Schultze, 2018) como en la parte central del país

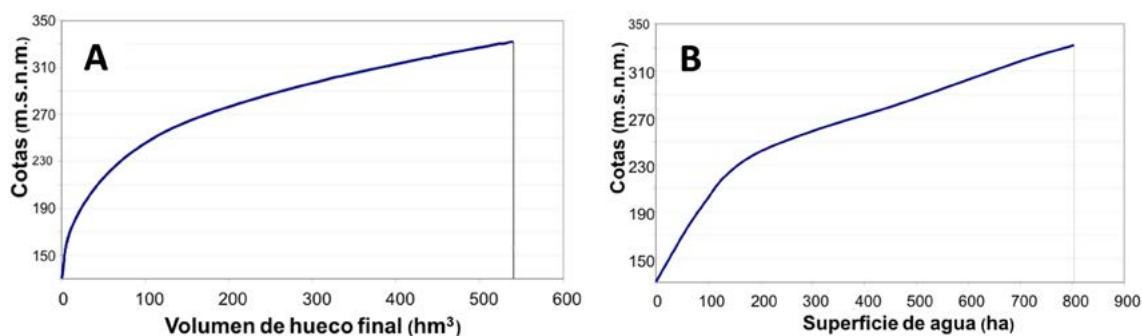


Figura 2. (A) Curva de volumen almacenado (hm^3) del hueco minero final de As Pontes en función de la cota (m). (B) Curva de superficie inundada (hm^2) del lago minero de As Pontes en función de la cota (m) (Vattenfall, 2013).

Figure 2. (A) Volume of water (hm^3) in the As Pontes open pit as a function of elevation (m). (B) Surface of the As Pontes pit lake (hm^2) as a function of elevation (m) (Vattenfall, 2013).

(Schultze *et al.*, 2010; 2011; McCullough and Schultze, 2018).

Macías *et al.* (2004) realizaron el estudio de la evaluación del impacto ambiental del proceso de llenado del hueco de la mina de As Pontes para su transformación en un lago minero. Para ello, utilizaron el método Batelle-Columbus (Dee *et al.*, 1973), consistente en la ponderación de diferentes indicadores ambientales, para comparar las siguientes tres alternativas de restauración medioambiental: (1) La denominada “situación actual” consistente en mantener el hueco en su estado final sin realizar ninguna restauración, (2) El “llenado pasivo” que contemplaba el llenado de forma continua y natural con la aportación de la lluvia como única fuente de llenado del hueco minero, y (3) El “llenado forzado” utilizando los recursos hídricos de las cuencas vertientes al hueco de mina, los caudales procedentes de las escombreras exteriores y los caudales derivados desde el río Eume. El resultado de esta evaluación de impacto ambiental corroboró que la opción del “llenado forzado” era la más adecuada para la recuperación ambiental del hueco final de la mina.

La opción del “llenado forzado” contemplaba la creación de un lago artificial con las aguas de todas las cuencas alteradas durante la explotación minera, y el desagüe del lago al río Eume a través del río Carracedo, afluente por la margen derecha del río Eume, que originalmente recogía las aguas de todos los cauces derivados, de forma directa o a través de otros. El lago tiene actualmente una superficie de 800 ha y contiene 540 hm^3 de agua para una cota igual a la cota de descarga del lago a través del canal de desagüe. Entre el nivel mínimo y el contorno afectado por la explotación quedarían unas 400 ha para las

que se diseñaron distintos usos y la restauración correspondiente en cada caso. La Figura 2 muestra las curvas de volumen almacenado y superficie inundada en función de la cota de llenado (Vattenfall, 2013). El proyecto de recuperación medioambiental de la corta minera de As Pontes y la creación de un lago artificial en el hueco minero, así como su informe de Declaración de Impacto Ambiental (Macías *et al.*, 2004) fueron revisados por las autoridades competentes que establecieron los caudales ecológicos y los criterios de calidad del agua de vertido de lago de As Pontes. Los criterios fueron establecidos por el Organismo Autónomo Aguas de Galicia que ostenta las competencias de la gestión del dominio público hidráulico en la Demarcación Hidrográfica de Galicia-Costa (Aguas de Galicia, 2005).

4. Metodología para el llenado del lago artificial

El principal problema que plantea la creación de un lago minero en una explotación de lignito proviene de la generación de aguas ácidas por el lavado de las piritas y otros sulfuros presentes en los materiales lignitíferos (Geller *et al.*, 1998, 2013). La disolución oxidativa de los sulfuros metálicos genera los drenajes ácidos de mina que deterioran la calidad del agua. Esto provoca la aparición de valores de pH entre 2 y 4, y promueve la solubilización de metales (Nordstrom and Alpers, 1999). Por este motivo, una vez seleccionado el “llenado forzado” como la solución idónea para la recuperación medioambiental del hueco minero de As Pontes se realizó un diagnóstico de la calidad química del agua del lago minero al finalizar el proceso de llenado antes del vertido de las aguas del hueco minero al río Eume. Para ello

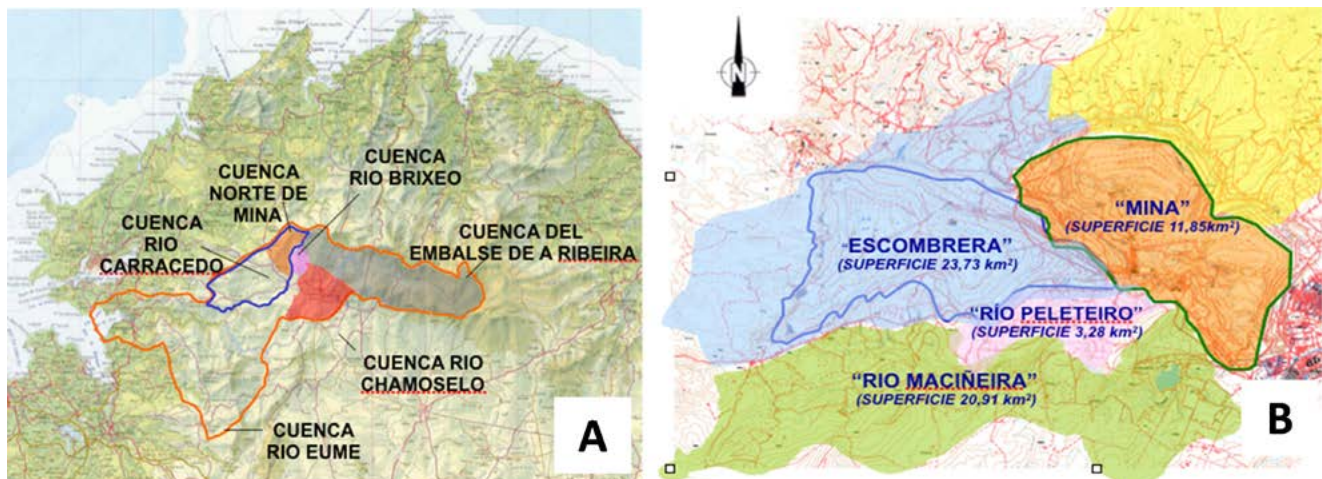


Figura 3. (A) Cuenca del río Eume y cuencas vertientes de aguas naturales consideradas en el llenado del lago minero de As Pontes. (B) Cuencas de la mina, las escombreras exteriores y de los ríos Peleteiro y Maciñeira (ENDESA, 2003a).

Figure 3. (A) Eume river basin and drainage basins of natural waters used to fill the As Pontes open pit lake. (B) Mine and external dumps drainage basins and Peleteiro and Maciñeira river basins (ENDESA, 2003a).

fue necesario considerar de forma separada los volúmenes disponibles y la calidad química de las distintas fuentes de agua a utilizar para el llenado del hueco minero.

4.1. Tipos de aguas consideradas en el llenado del lago

Los tipos de aguas consideradas en el llenado del lago minero se diferenciaron en aguas naturales y aguas afectadas por la explotación minera. Las aguas naturales incluyen las procedentes de las cuencas vertientes del norte de la mina y las de los ríos Peleteiro, Maciñeira y Eume. Las aguas afectadas por la explotación de la mina incluyen la precipitación sobre el hueco minero y la escorrentía procedente de las escombreras exteriores. La Figura 3 muestra la cuenca del río Eume y las cuencas vertientes al hueco minero (aguas naturales) que se consideraron para el llenado del hueco, así como las denominadas cuencas de mina y de las escombreras cuyos caudales se incorporaron al llenado y las cuencas de los ríos Peleteiro y Maciñeira cuyos caudales se derivaron directamente al río Eume para aumentar sus caudales ecológicos aguas abajo del punto de desvío de la derivación del río Eume hacia el lago (ENDESA, 2003a).

4.2. Aportaciones de agua disponibles para el llenado del lago

La evaluación de las aportaciones de las aguas naturales disponibles se realizó mediante un estu-

dio hidrológico a partir de los datos diarios de aportaciones al embalse de A Ribeira, situado en el río Eume aguas arriba del hueco minero, y de los caudales desaguados entre 1989 y 2002 (ENDESA, 2003b). Entre el embalse y el punto previsto para la derivación de los caudales del río Eume éste recibe las aguas de los arroyos Chamoselo y Brixeo y las del canal de derivación de los arroyos situados al norte de mina. Los caudales de estos últimos cauces se estimaron a partir de las aportaciones al embalse teniendo en cuenta la proporcionalidad de las superficies de sus cuencas.

La curva de aportaciones anuales derivadas al lago en función de la capacidad del canal de derivación indicaba que el caudal óptimo de derivación desde el río Eume al lago es del orden de 20 m³/s (ENDESA, 2003a). Se detrajeron de las aportaciones disponibles las servidumbres asociadas a los consumos de la central térmica de As Pontes (21 hm³/año), la aportación necesaria para el abastecimiento urbano e industrial de As Pontes (4 hm³/año) y los caudales ecológicos previstos en la concesión de derivación, que varían entre 2.2 y 3.5 m³/s. Con estas hipótesis, la aportación media disponible de aguas naturales en el río Eume resultó ser igual a 105 hm³/año.

La cuenca de la mina tiene una superficie de 12 km², presenta altas pendientes y está prácticamente desprovista de vegetación. La aportación media anual es aproximadamente igual a 20 hm³/año. Las escombreras exteriores ocupan una superficie de 23 km². Para una lluvia neta de 1000 mm/año, se estima una aportación media anual igual a 23 hm³.

4.3. Calidad química de las aguas utilizadas en el llenado del lago

La calidad química de las aguas naturales, de mina y de las escombreras exteriores utilizadas en el llenado del lago minero de As Pontes se determinó a partir de muestras utilizadas para el llenado del hueco minero (Vattenfall, 2013). Para ello se analizaron los siguientes parámetros físicos y químicos: temperatura, pH, conductividad

eléctrica, alcalinidad, cloruro, sulfato, bicarbonato, nitrato, calcio, magnesio, sodio, potasio, amonio, hierro, aluminio y manganeso. La fiabilidad de los análisis químicos se contrastó mediante la comprobación del error en el balance de cargas.

En la Figura 4A se presentan los valores de las medianas de los parámetros químicos indicados de los cuatro cauces representativos de las aguas naturales. Estas aguas son ligeramente ácidas, con un pH en torno a 6 y una mineralización muy

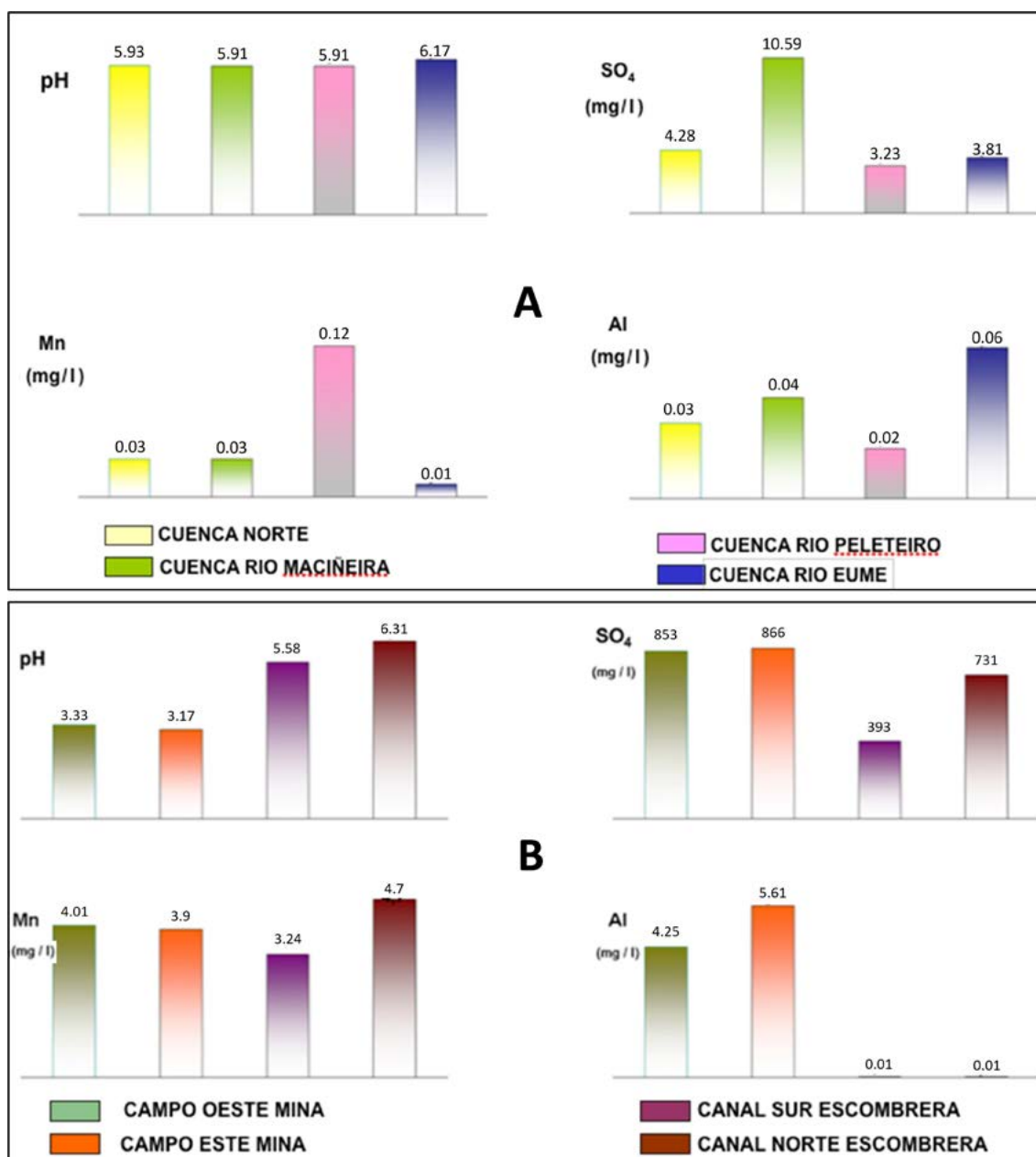


Figura 4. Valores de la mediana del pH y de las concentraciones de sulfato, manganeso y aluminio en: (A) las aguas naturales en las cuencas Norte, Maciñeira, Peleteiro y Eume; y (B) las aguas de mina en los campos Este y Oeste y en los canales Norte y Sur de las escombreras exteriores (Vattenfall, 2013).

Figure 4. Values of the median of pH and concentrations of sulphate, manganese and aluminum in: (A) the natural waters in the basins North, Maciñeira, Peleteiro and Eume; and (B) the East and West mine pits and North and South channels of the exterior tailings (Vattenfall, 2013).

baja. La concentración de sulfato es igual a 5 mg/l, mientras que las concentraciones de manganeso y aluminio son menores de 0.05 mg/l.

Las características químicas de las aguas de la mina se determinaron a partir de las muestras tomadas en dos depósitos de bombeo de la mina, situados en los campos este y oeste de la explotación minera (Vattenfall, 2013). La Figura 4B presenta los valores de las medianas del pH y de las concentraciones de sulfato, manganeso y aluminio en las aguas de mina. El pH era ligeramente superior a 3. Las concentraciones de sulfato eran mayores de 850 mg/l, las de manganeso eran del orden de 4 mg/l y las del aluminio eran ligeramente superiores a 4 y 5.5 mg/l en los campos este y oeste de mina, respectivamente.

Las características químicas de las aguas de las escombreras exteriores se caracterizaron a partir de las muestras obtenidas en los canales norte y sur que la bordean (Vattenfall, 2013). En la Figura 4B se observa que el pH en ambos canales era del orden de 6 y la concentración de aluminio estaba por debajo del límite de detección (0.01 mg/l). La implantación de la revegetación era mayor en la parte norte de las escombreras exteriores. Debido a la menor interacción de las aguas de escorrentía con los estériles de mina, las muestras del canal norte presentaban una menor mineralización con concentraciones de sulfato menores de 400 mg/l y las de manganeso del orden de 3 mg/l. Las aguas del canal norte, sin embargo, presentaban concentraciones de sulfato mayores de 700 mg/l y concentraciones de manganeso de 4.7 mg/l.

5. Simulación numérica de los escenarios de llenado del lago

Se realizaron simulaciones de la calidad del agua al final del llenado del lago para estimar la composición química de las aguas vertidas por el lago al río Eume para diferentes escenarios de llenado del lago. Los escenarios se identificaron teniendo en cuenta los condicionantes hidrológicos e hidroquímicos.

5.1. Modelo de mezcla perfecta

Vattenfall (2003) realizó un modelo de mezcla perfecta para predecir la evolución de la calidad química de las aguas del lago. En este trabajo se utilizó el código PHREEQC (Parkhurst *and* Appelo, 1999) y se supuso mezcla conservativa para Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} y Cl^- , mientras que el pH

y las concentraciones de Fe^{2+} , Al^{3+} y Mn^{2+} se consideraron como especies no conservativas. En este modelo se consideraron las siguientes características del lago: volumen aproximado igual a 541 hm³, profundidad máxima igual a 192 m y superficie de lámina de agua aproximadamente igual a 8 km². Se evaluaron diferentes escenarios de llenado del lago que afectaban directamente a la calidad química del agua. En todos ellos se supuso que el lago tendría una mezcla perfecta e instantánea. Este modelo consideraba inertes las paredes del lago. Se consideraron los siguientes aportes de agua al lago: las aguas de escorrentía del hueco minero, las aguas de las cuencas de las escombreras exteriores, las aportaciones de los ríos vertientes al hueco minero y la precipitación sobre el hueco minero. La única salida de agua del lago durante el llenado del lago es la evaporación desde la lámina libre.

La estimación de la calidad química en el lago se realizó combinando el balance hídrico, los balances de masas y la modelización hidrogeoquímica para tener en cuenta el efecto de la mezcla de los diferentes tipos de aguas y las modificaciones provocadas por el entorno. Se utilizó un enfoque termodinámico, es decir, todas las reacciones químicas se consideraron en condiciones de equilibrio químico.

En la Tabla 1 se muestran los escenarios de llenado analizados para el pronóstico de la calidad química del lago de As Pontes con las subcuencas de aportación consideradas, el aporte anual de agua y el tiempo de llenado estimado (Vattenfall, 2003). En la Tabla 2 se muestra la calidad química media de los diferentes tipos de aguas consideradas en cada subcuenca de aportación (Vattenfall, 2003). En la Tabla 3 se recogen los resultados para las especies químicas más relevantes utilizando los escenarios de llenado de la opción 3, que es la que consideraba una mayor aportación de aguas naturales (Vattenfall, 2003). Con excepción del pH, que nunca parecía alcanzar valores mayores de 6, los resultados de este modelo indicaban que las aguas de vertido del lago de As Pontes estarían dentro de los rangos de valores de cumplimiento requeridos por Aguas de Galicia (2005) dentro del proceso de Declaración de Impacto Ambiental que incluían: $5.7 < \text{pH} < 9$, concentración de $\text{SO}_4^{2-} < 250$ mg/l, concentración de $\text{Fe} < 1$ mg/l, concentración de $\text{Al} < 1$ mg/l y concentración de $\text{Mn} < 2$ mg/l.

En Vattenfall (2003) se realizó también un análisis de sensibilidad de la calidad química de las aguas de mina utilizando la opción de llenado

Escenario	Subcuencas de aportación	Aporte anual (hm ³)	Tiempo de llenado (meses)
Opción 1	Mina + Escombrera + Peleteiro + Norte	73.06	88
Opción 2	Mina + Escombrera + Peleteiro + Norte + Maciñeira	93.49	66
Opción 3a	Idem Opción 2 + Eume 0.5 m ³ /s	109.25	59
Opción 3b	Idem Opción 2 + Eume 1 m ³ /s	125.02	51
Opción 3c	Idem Opción 2 + Eume 1.5 m ³ /s	140.79	44
Opción 3d	Idem Opción 2 + Eume 2 m ³ /s	156.56	40
Opción 3e	Idem Opción 2 + Eume 2.5 m ³ /s	172.33	38
Opción 4	Mina + Escombrera + Peleteiro	45.85	140
Opción 5	Mina	19.46	340

Tabla 1. Descripción de los diferentes escenarios de llenado considerados por Vattenfall (2003) para el pronóstico de la calidad química del lago de As Pontes.

Table 1. Description of the different scenarios considered by Vattenfall (2003) for predicting the final water quality of the As Pontes pit lake.

Parámetros	Río Eume	Río Maciñeira	Norte	Río Peleteiro	Escombrera		Mina	
					16B	1B	OB4	1EB
pH	6.17	5.91	5.93	5.9	6.31	5.58	3.17	3.33
CE [μS/cm]	49	76	55	66.7	1.305	763	1.628	1.405
pe	12.5	8.8	7.7	6.9	5.1	7.1	13.3	13.1
Ca [mg/l]	1.80	3.30	0.86	0.76	136	82	128	106
Mg [mg/l]	0.90	0.39	0.70	0.52	49.83	21.65	55.1	38.06
Na [mg/l]	4.21	4.45	4.82	3.73	21.06	9.68	27.88	9.82
K [mg/l]	0.70	0.64	0.49	0.73	3.94	1.72	2.42	2.81
Cl [mg/l]	6.59	7.50	7.67	7.46	8.16	7.48	7.22	7.84
Alcalinidad [mmol/l]	0.03	0.03	0.03	0.03	0.56	0.50	0.0	0.0
SO4 [mg/l]	3.81	10.59	4.28	3.23	731	393	867	853
Fe [mg/l]	0.04	0.02	0.01	0.04	1.19	3.26	6.06	3.19
Al [mg/l]	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	5.61	4.25
Mn [mg/l]	0.01	0.03	0.03	0.12	4.7	3.24	3.9	4.01
NO3 [mg/l]	1.49	1.52	1.11	1.70	1.43	0.93	0.89	0.86
NH4 [mg/l]	0.04	0.02	0.01	0.04	0.62	0.09	1.14	0.37

Tabla 2. Calidad química de las muestras representativas de las subcuencas de aportación para la modelización hidroquímica de la evolución de la calidad en el lago de As Pontes (Vattenfall, 2003).

Table 2. Chemical quality of the representative samples of the contributing basins used in the mixing-cell hydrochemical model of the As Pontes pit lake (Vattenfall, 2003).

más favorable, apreciándose que el sistema reaccionaba de forma sensible a las modificaciones en la acidez del agua de mina. Por otra parte, se consideraron otras posibles alternativas para el llenado, como la utilización de los efluentes de la

central térmica de As Pontes. En esta alternativa las principales diferencias se presentaban en el pH y las concentraciones de aluminio y sulfato.

El estudio de Vattenfall (2003) permitió concluir que la evolución de la calidad química del lago de

Escenarios	pH		Mn (mg/l)		Sulfatos (mg/l)		Fe (mg/l)		Al (mg/l)	
Opción 3a	3.4	4.8	2.31	1.40	338	161	2.72	0.09	2.90	0.55
Opción 3b	3.5	4.9	1.64	1.23	240	142	1.94	0.07	2.07	0.49
Opción 3c	3.6	5.0	1.27	1.11	186	128	1.51	0.06	1.61	0.44
Opción 3d	3.7	5.1	1.04	1.00	152	116	1.24	0.05	1.33	0.41
Opción 3e	3.8	5.1	0.88	0.89	129	104	1.05	0.05	1.13	0.38

Tabla 3. Valores de pH y concentraciones de Mn, SO₄²⁻, Fe y Al al inicio (columna izquierda) y a la finalización (columna derecha) del período de llenado para los escenarios de la opción 3 (Vattenfall, 2003).

Table 3. Values of pH and concentrations of manganese, sulphate, iron and aluminum at the beginning (left column) and at the end (right column) of the filling period of As Pontes pit lake for option # 3 scenarios (Vattenfall, 2003).

As Pontes considerando un modelo de mezcla perfecta dependía principalmente de la duración del proceso de llenado y de la calidad química de las aguas de llenado utilizadas. El análisis de los distintos escenarios de llenado indicó la necesidad de un llenado rápido del lago con la aportación máxima de aguas naturales, utilizando para ello los mayores caudales posibles derivados del río Eume. Con la derivación del río Eume el período medio de llenado pasaba a ser del orden de 3 años (considerando que el llenado comenzaba con el año hidrológico). En este otro escenario el llenado se realizaba con una aportación de 393 hm³ de aguas naturales, 84 hm³ de aguas procedentes de las cuencas de las escombreras exteriores y 71 hm³ de la lluvia sobre el hueco y las aportaciones de la cuenca del hueco minero. Durante este período se estimó una evaporación de 8 hm³. En todo momento los caudales ecológicos previstos eran superiores a los necesarios para preservar los sistemas ambientales existentes de acuerdo con los requerimientos de Aguas de Galicia (2005).

A partir de los datos morfológicos del hueco minero inundable se estimó que el lago resultante sería meromítico, es decir, que no se produciría la mezcla total de la columna de agua en ningún período del año, por lo que la capa más profunda del lago, el monimolimnion, no se mezclaría con la capa superficial, el mixolimnion. El mixolimnion se previó que estaría compuesto de tres capas, el epilimnion, la más superficial, de 8 m de espesor, el hipolimnion, la más profunda, de 45 m de potencia, y el metalimnion, la capa de transición entre ellas.

5.2. Modelo de flujo y de calidad de las aguas del lago

Como paso previo a la elaboración del modelo geoquímico de lago estratificado, Samper *et al.*

(2008) realizaron un modelo geoquímico de mezcla perfecta con el código CORE^{2D} V4 (Samper *et al.*, 2011) similar al de Vattenfall (2003). Tanto los caudales de agua para el llenado (39 meses) como la composición química de las aguas de entrada (mina, escombreras exteriores, río Eume y lluvia) fueron similares a los utilizados en Vattenfall (2003). El modelo geoquímico utilizado consideró los siguientes tipos de reacciones químicas: complejación acuosa, ácido-base, redox, disolución/precipitación de minerales, disolución/ex-solución de gases y complejación superficial. El sistema químico se definió mediante las siguientes 15 especies primarias: H₂O, H⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Fe²⁺, Mn²⁺, Al³⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, SiO₂(aq), O₂(aq) y XOH. Los complejos acuosos, minerales, gases y complejos superficiales, así como los parámetros químicos empleados en el modelo se detallan en Samper *et al.* (2008). Los resultados del modelo geoquímico de mezcla perfecta de Samper *et al.* (2008) reprodujeron los obtenidos por Vattenfall (2003). Las concentraciones químicas de las aguas de las escombreras exteriores y del hueco minero se actualizaron teniendo en cuenta los datos obtenidos entre 2006 y 2007 de muestras analizadas en el laboratorio químico de la planta de tratamiento de los efluentes líquidos (TEL) de ENDESA.

Una vez calibrado el modelo conceptual geoquímico, se actualizaron las predicciones de la evolución de la calidad química del lago de As Pontes utilizando valores actualizados de los caudales de entrada de agua para tener en cuenta los caudales ecológicos establecidos por Aguas de Galicia en su autorización de vertido (Aguas de Galicia, 2005). También se realizaron análisis de sensibilidad para identificar los parámetros que más influían en la calidad de las aguas al final de llenado. Los resultados numéricos indicaron que: (1) El pH del agua de la mina tenía un efec-

to determinante en el pH final y en la concentración total de Fe disuelto, (2) La concentración de SO_4^{2-} en el agua del lago aumentaba cuando se aumenta la concentración de SO_4^{2-} en el agua de las escombreras exteriores, y (3) La concentración de Fe y el pH en el lago parecían no ser sensibles a la variación del pH del agua de las escombreras exteriores, salvo cuando este pH se reducía drásticamente.

Además, Samper *et al.* (2008) evaluaron el efecto de diferentes medidas correctoras como: 1) Añadir cal en la superficie del hueco minero, 2) Añadir $\text{CaCO}_3(\text{s})$ al agua de llenado, 3) Añadir conchas en las superficies del fondo de la mina, y 4) Recubrir con capas de arcilla las zonas piritosas del hueco minero. Los resultados del modelo indicaban claramente que todas estas medidas eran efectivas para mejorar el pH final del agua del lago.

Para avanzar en la simulación del proceso de llenado, que previsiblemente debería de arrojar mejores valores en la calidad del vertido al río Eume, el grupo AQUATERRA de la Universidad de A Coruña realizó el acoplamiento de los códigos de hidrodinámica y calidad de lagos DYRESM (Antenucci *and* Imerito, 2002, 2003) y CAEDYM (Romero *et al.*, 2004) con las subrutinas geoquímicas del código CORE^{2D} V4 (Molinero *et al.*, 2004; Samper *et al.*, 2011). El código resultante DYCD-CORE (Samper *et al.*, 2008; Moreira, 2010) fue ampliamente verificado antes de su aplicación al lago de As Pontes. Además, fue utilizado para modelizar el lago meromítico de Waldsee en Alemania (Moreira *et al.*, 2011). Con este código el grupo AQUATERRA de la Universidad de A Coruña realizó la modelización del flujo y la calidad de las aguas del lago mediante un modelo unidimensional, hidrodinámico, térmico y geoquímico con estratificación vertical (Samper *et al.*, 2006, 2008). Se realizaron predicciones de la evolución de la temperatura, salinidad y geoquímica de las aguas del lago de As Pontes durante el llenado para el plan de llenado contemplado en el proyecto de ENDESA así como para los siguientes escenarios: 1) La adición de diferentes cantidades de cal, y 2) La adición de los efluentes de la central térmica de As Pontes al hueco de mina durante la fase de llenado.

Los resultados del modelo mostraron la existencia de un ciclo de estratificación a partir de los primeros meses del llenado. En otoño-invierno, época en la cual se producen las principales aportaciones para el llenado, se observa una mezcla

casi completa con un perfil casi homogéneo de temperatura. Sin embargo, desde mediados de la primavera hasta mediados de octubre se observa una clara estratificación. El grado de estratificación parecía estar controlado principalmente por el coeficiente de extinción de la luz, que a su vez depende directamente de la intensidad de la radiación solar. Cuanto mayor es la penetración de la luz, mayor es la temperatura de las aguas más profundas y menor su densidad. Por este motivo aumenta el grado de mezcla y se produce una homogenización de las concentraciones dentro de la columna de agua. La fracción de agua del río Eume en las capas superficiales es significativamente mayor que en las aguas del fondo del lago. Gran parte del agua procedente del río Eume permanece en las capas más superficiales al tratarse de aguas menos densas. La fracción de agua del Eume en la capa superficial es mayor que la que se tendría en el caso de mezcla perfecta. Este resultado tiene una gran trascendencia para la calidad final de las aguas fluyentes del lago que proceden fundamentalmente de las capas más superficiales. Hay que destacar que en las capas superficiales del lago la fracción de agua de mina es menor que la fracción de agua de mina en el caso de mezcla perfecta.

La modelización mostró la presencia de un epilimnion de 20 m de potencia que mantiene una temperatura constante y homogénea comprendida entre 8 y 9 °C durante la época fría, mientras que en la estación estival la temperatura variaba casi linealmente entre 8° C y algo más de 20 °C en la superficie. Estas predicciones son consistentes con los datos que se registraron en el lago (véase Figura 5).

Los resultados del modelo termo-hidro-geoquímico indicaron que: (1) Las aguas ácidas procedentes de las cuencas de mina y de las escombreras exteriores tienden a acumularse en las partes más profundas del lago ya que son más salinas y por lo tanto más densas, (2) La fracción de agua de mina en las aguas superficiales se hace cada vez más pequeña a medida que progresa el llenado, de forma que el pH de las capas superficiales sólo se ve afectado por las aguas de las escombreras exteriores que son rápidamente diluidas por las entradas de aguas naturales, el agua procedente del río Eume y los efluentes alcalinos de la central térmica de As Pontes, (3) El pH final del agua del lago es mayor que 6, (4) Las aguas con más sulfato tienden inicialmente a irse hacia el fondo del lago, mien-

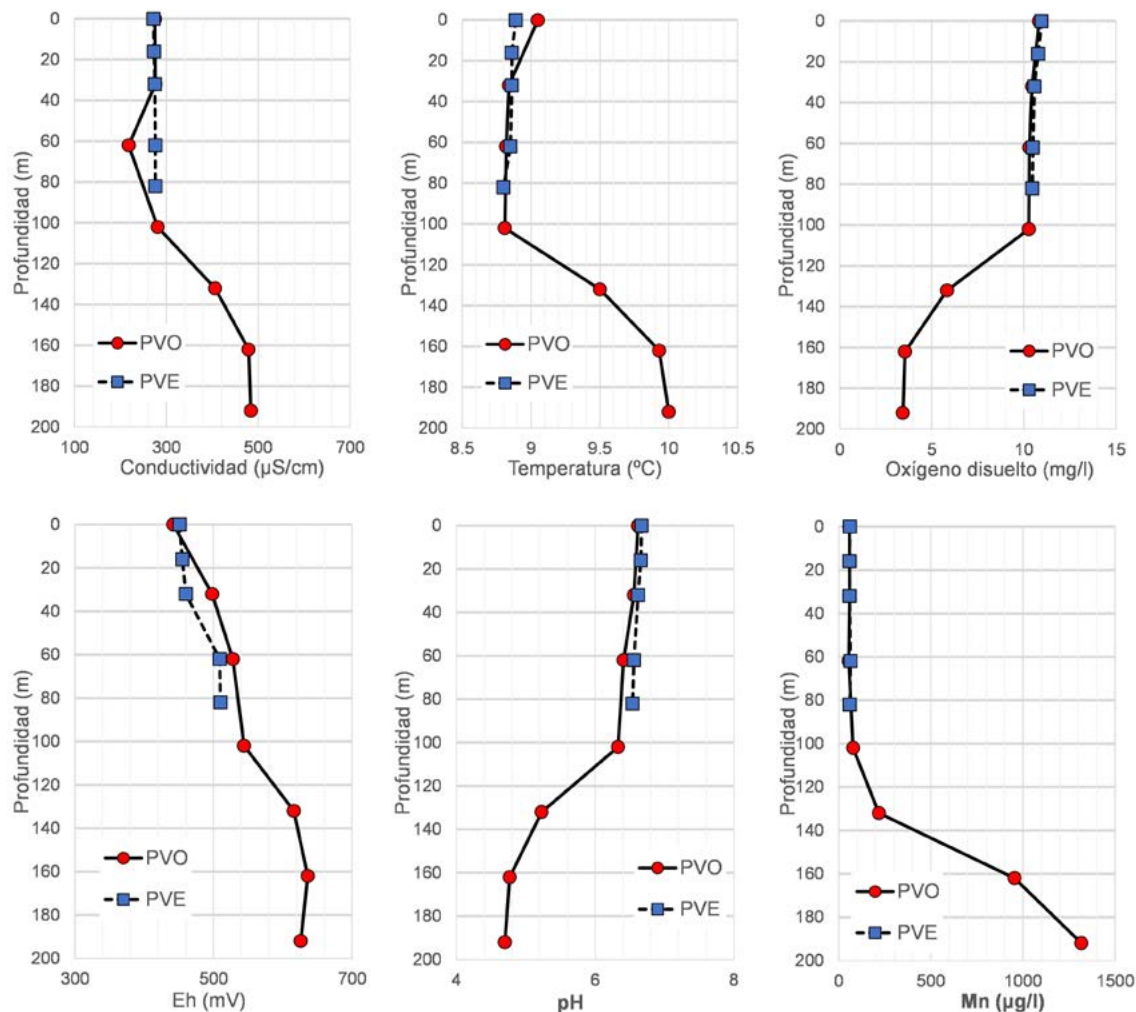


Figure 5. Perfiles verticales de la calidad de las aguas del lago a diferentes profundidades en el primer trimestre de 2015 en dos puntos situados en el campo este (PVE) y el campo oeste (PVO) del lago de As Pontes cuya situación aproximada se muestra en la Figura 5 (GEAMA, 2016).

Figure 5. Vertical profiles of water quality in the first semester of 2015 in two sampling points located in the East side (PVE) and West side (PVO) of the As Pontes pit lake. Their location is shown in Figure 5 (GEAMA, 2016).

tras que las aguas de las escombreras exteriores se acumulan en una zona intermedia, (5) Las aguas del río Eume, con muy poca concentración de sulfato y poco mineralizadas, se acumulan en las capas más superficiales del lago, de forma que las concentraciones de sulfato en las aguas superficiales están por debajo del valor límite admisible establecido por Aguas de Galicia (2005), (6) La concentración de hierro total disuelto es menor de 1 mg/l gracias a la precipitación de ferrihidrita, ya que el pH es mayor de 4.5 en la mayor parte de las aguas del lago durante prácticamente todo el llenado, y (7) Las concentraciones de Al y Mn evolucionan de forma similar a las del sulfato. En los 40 m más superficiales las concentraciones de Al y Mn se encuentran por debajo de los límites admisibles (1 mg/l para el Al y 2 mg/l para el Mn).

Las medidas correctoras basadas en la adición de cal y de los efluentes de la central térmica se vio que afectaban principalmente a las aguas más superficiales en el caso del lago estratificado, observándose además grandes diferencias según el grado de estratificación. Por otro lado, la adición de los efluentes de la central térmica procedentes de la planta de tratamiento de los efluentes líquidos, en el que recibían un aporte alcalino, determinaba en gran medida el pH final debido a su aporte de alcalinidad durante todo el año. Los efluentes de la central térmica ayudan a neutralizar las aguas ácidas, incluso en las épocas en las que no se deriva agua del río Eume. Es importante destacar que los fenómenos de complejación superficial del protón (Appelo *and* Postma, 1993; Langmuir, 1997; Lu *et al.*, 2011) son fundamentales para obtener pH mayores de 6 tanto en la

superficie del lago como en las capas más profundas.

La Figura 6 muestra la evolución temporal durante parte del período de llenado (enero 2008 – enero 2011) de los valores calculados del pH y de las concentraciones de sulfato, Al y Fe. Los parámetros de la calidad química de las aguas de rebose del lago mejoraban con respecto a los calculados con el modelo de mezcla perfecta. El pH alcanzaba valores próximos a 7 en el modelo de lago estratificado. Las aguas con mayor concentración de sulfato y Al se acumulan en las capas más profundas debido a su densidad. Las concentraciones de Al y Fe en las capas superficiales y en el agua de rebose del lago se mantenían por debajo de 100 mg/l y 0.5 mg/l, respectivamente. La concentración de Fe fue muy baja durante todo el llenado ya que el pH se mantenía siempre por encima de 4.5.

6. Estudio de oleaje en las orillas del lago

Las orillas del lago minero de As Pontes están compuestas por materiales terciarios, correspon-

dientes al tramo productivo del yacimiento, materiales ordovícicos en contacto con los anteriores que lo contienen y materiales terciarios apilados en las escombreras exteriores (ENDESA, 2002; Samper *et al.*, 2006). Los materiales terciarios y de relleno son materiales fácilmente erosionables, tanto los lignitos como los detríticos, fundamentalmente arcillosos, en los que se intercala. Las filitas y cuarzoilitas ordovícicas presentan consistencia variable dependiendo de su meteorización, que varía desde débil, en la zona suroeste del contorno del lago, a fuerte en el borde noreste.

Para evaluar el efecto de la lámina de agua del lago en las orillas de lago se realizó un estudio de oleaje mediante el modelo de Berkhoff (Berkhoff *et al.*, 1982) que tiene en cuenta los fenómenos de refracción, difracción, reflexión y otros fenómenos de variación de la energía de la ola como consecuencia de la variación o proximidad del fondo. En la Figura 7 se presenta la altura de ola significativa (promedio del tercio de olas de mayor altura) en el contorno del lago de As Pontes que varía entre 1 m en los extremos noroeste y sureste y 40 cm en los bordes noreste y suroeste (Al-

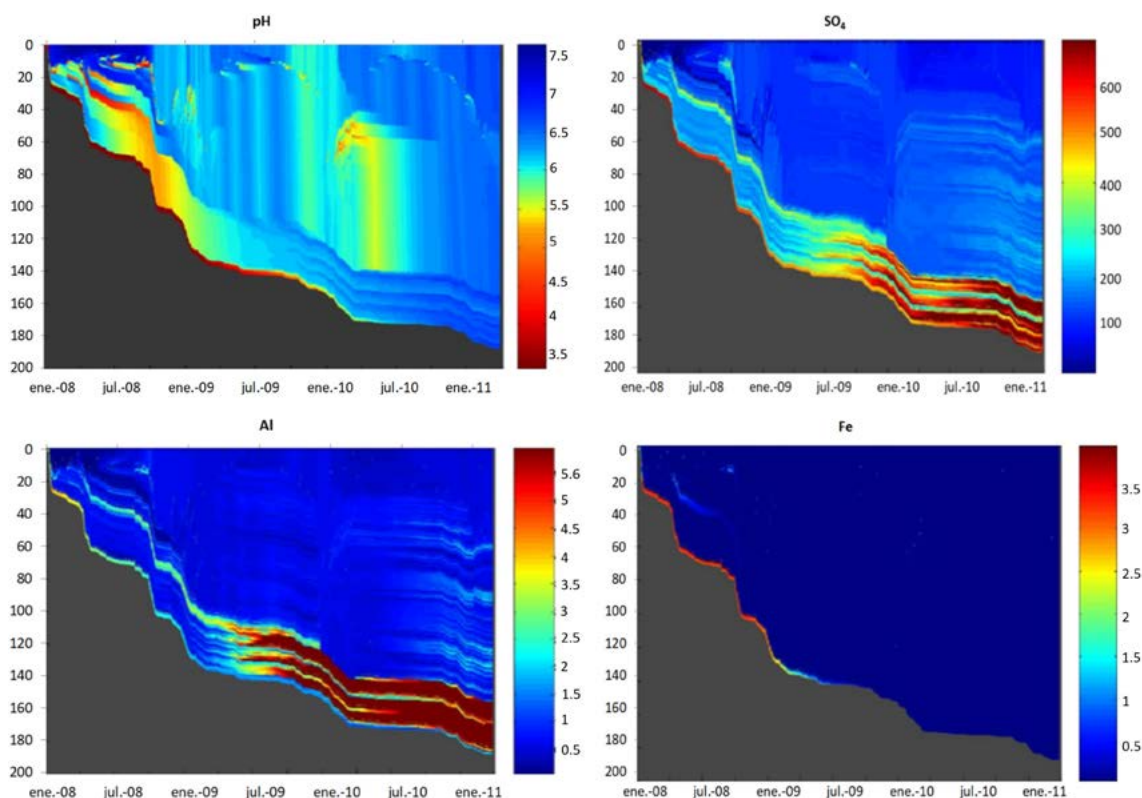


Figura 6. Diagrama de evolución temporal del pH y de las concentraciones de sulfato, Al y Fe en función de la profundidad del agua durante el llenado del lago de As Pontes (Samper *et al.*, 2008).

Figure 6. Diagram of time evolution of pH and the concentrations of sulphate, Al and Fe as a function of lake depth during the filling of the As Pontes pit lake (Samper *et al.*, 2008).

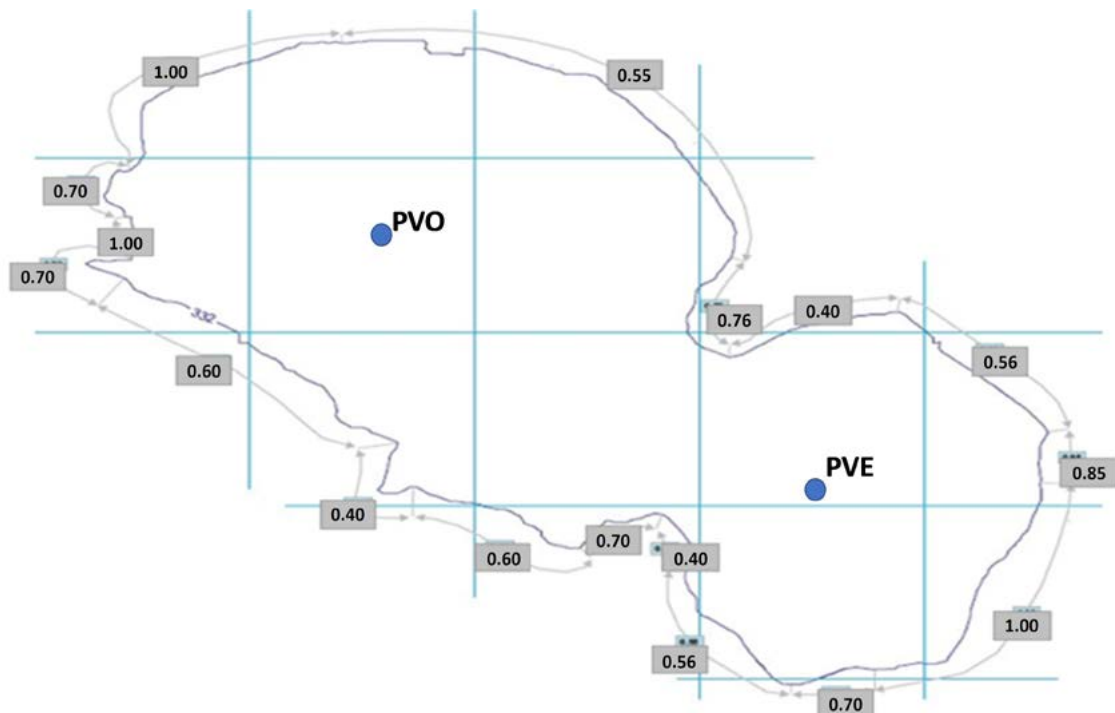


Figura 7. Altura de ola significativa (m) a lo largo del contorno del lago de As Pontes (Almazán, 2003) y situación aproximada de los dos puntos en los que se realizaron perfiles de calidad química en 2015 en la zona oeste (PVO) y zona este (PVE).

Figure 7. Significant wave height (m) along the border of the As Pontes pit lake (Almazán, 2003) and approximate location of the points in which chemical quality profiles were carried out in 2015 in the western zone (PVO) and eastern zone (PVE) of the As Pontes lake.

mazán, 2003). En el límite sureste del lago, en el que se colocó la escombrera interior, se proyectó una playa artificial y en el resto del contorno una protección con escollera en las zonas de baja resistencia de la roca.

7. Estudio geotécnico de la estabilidad de los taludes de la mina

El extenso contorno de la explotación minera, con cerca de 18 km de perímetro, y la considerable profundidad alcanzada, con un máximo de casi 200 m, pone de relieve la importancia que la estabilidad de los taludes tuvo durante la operación de la mina. Para el proyecto de explotación se realizó un estudio geotécnico que puso de manifiesto la necesidad de rebajar los niveles piezométricos en determinadas zonas del contorno de la mina para garantizar la estabilidad de los taludes (Velasco, 2003). Durante la explotación minera se produjeron deslizamientos de notables proporciones en algunos taludes de la corta minera. Estos problemas se resolvieron mediante una combinación de trabajos de drenaje y la construcción de un dique de contención. Se consiguió concluir la explotación de la mina sin que se re-

gistraran signos de inestabilidad en sus extensos y profundos taludes (Velasco, 2003; Aréchaga *et al.*, 2011).

El llenado de la corta minera modificó las condiciones de estabilidad por la presión directa del agua libre sobre los taludes de la mina y el cese del drenaje existente a lo largo de los taludes. Se realizó un estudio geotécnico de la estabilidad de los taludes durante el llenado y al finalizar el mismo mediante el análisis de ocho perfiles con el método de equilibrio límite de Spencer-Wright (Oliva, 2015). Las conclusiones del estudio indicaron que el llenado mejoraba las condiciones de estabilidad. Además, se vio que el llenado rápido de la corta minera favorecía la estabilidad de los taludes.

La sismicidad inducida por embalses y lagos suele estar asociada al llenado y a grandes cambios en el nivel del agua (Talwani, 1997). Los sismos más importantes suelen presentarse en respuesta a grandes cambios del nivel del lago (comparables a la profundidad del lago). Puesto que las oscilaciones previsibles del nivel del lago de As Pontes son menores de 1 o 2 m, no se considera que la sismicidad inducida pueda ser relevante en el lago de As Pontes. No obstante,

para controlar la posibilidad de que el llenado produjera sismicidad inducida se instalaron dos sismógrafos de control.

8. Llenado del lago

El llenado del lago se inició a finales de enero de 2008 y el primer rebose se produjo en abril de 2012. La duración del llenado fue de 50 meses, algo mayor de lo estimado en el proyecto (40 meses). La diferencia se debió fundamentalmente al hecho de que en fase de proyecto se previó que el llenado se iniciase con el año hidrológico (octubre) y con el aporte de todas las cuencas hidrológicas consideradas. En la práctica, el llenado comenzó en enero sin las aportaciones del río Eume, la principal fuente de caudales, que no se incorporaron hasta octubre de 2008. Los datos reales del llenado del lago confirmaron en general las predicciones hidrológicas del llenado.

8.1. Calidad química del lago

En la Figura 5 se muestran los perfiles de calidad correspondientes al primer trimestre de 2015 en dos puntos del lago de As Pontes situados, aproximadamente, en el centro del campo este (PVE) y campo oeste (PVO) (GEAMA, 2016). Las mediciones en el punto PVE se realizaron hasta 82 m de profundidad y en el PVO hasta 192 m, que se corresponden sensiblemente con el fondo del lago en dichos puntos en las fechas en las que se realizaron las medidas. En ambos perfiles se observa la existencia de una termoclina que se encuentra entre 16 y 32 m de profundidad en el punto PVE y a 32 m de profundidad en el punto PVO. La temperatura máxima del lago en superficie varía entre 20°C y 22°C en los meses de agosto y septiembre y entre 8 y 9°C en enero y febrero. Al inicio del invierno (noviembre/diciembre) se produce una homogeneización térmica y química del agua del lago hasta 40 m de profundidad, existiendo por debajo de esta profundidad una desconexión del fenómeno de mezcla estacional. Se observa igualmente una quimioclina en el punto PVO entre 102 y 132 m, que no se detecta en el punto PVE porque en este punto la profundidad del lago es menor (Figura 5). Los valores de la termoclina y el mixolimnion difieren de los estimados a partir de los datos morfológicos, que variaban entre 8 y 53 m respectivamente, y de los estimados mediante el código DYCD-CORE (Samper *et al.*, 2008; Moreira,

2010) en la modelización del flujo y la calidad de las aguas del lago mediante el modelo unidimensional, hidrodinámico, térmico y geoquímico con estratificación vertical (Samper *et al.*, 2006, 2008). Estas discrepancias son atribuibles a las incertidumbres que conllevan la estimación de la estratificación de un lago a partir de los datos morfológicos y mediante la modelización hidrodinámica.

Los datos obtenidos de los perfiles durante el llenado del lago confirman que el lago de As Pontes es meromíctico y que por tanto está estratificado todo el año (Figura 5). Cabe esperar un comportamiento oligotrófico, con una escasa actividad biológica como consecuencia de la escasez en nutrientes básicos como el fósforo. No obstante, el N en forma de nitratos podría permitir el desarrollo de una biomasa autóctona de microalgas (fitoplancton) en el lago. Se recomienda realizar un seguimiento periódico de los parámetros que controlan la actividad biológica.

En los perfiles de calidad se constata que los valores de la mayoría de los parámetros químicos analizados son más favorables en las capas superficiales del lago que en la parte profunda del lago, tal y como indicaban las predicciones de los modelos de Samper *et al.* (2008) realizados con el código DYCD-CORE.

La Tabla 4 muestra los resultados de los análisis mensuales de las aguas del lago en el punto de rebose en 2015 (GEAMA, 2016). Todos los parámetros analizados se encuentran por debajo de los límites fijados por el organismo autónomo Aguas de Galicia para el vertido (Aguas de Galicia, 2005). Así, el pH oscila entre un máximo de 7.12 y un mínimo de 6.38, valores próximos al valor del pH de las aguas naturales del entorno, y dentro del rango de valores autorizados para el agua de rebose (entre 5.7 y 9). La concentración de sulfato se mantiene en el entorno de 100 mg/l, siendo inferior al valor límite de autorización de vertido que es igual a 250 mg/l. De forma análoga, las concentraciones de Al, Mn y Fe son mucho menores que sus correspondientes valores máximos autorizados para el vertido (1 mg/l para el Al y el Fe y 2 mg/l para el Mn) por Aguas de Galicia (2005).

Otros parámetros significativos a los que se fijaron límites máximos autorizados para las aguas de rebose del lago al río Eume incluyen: los sólidos en suspensión (25 mg/l), la conductividad eléctrica (500 μ S/cm), los fosfatos (0.2 mg/l), el amonio total (1 mg/l), los sulfatos (250 mg/l) y los sulfuros (1 mg/l). Todos ellos se en-

Fecha	09/01/2015	09/02/2015	08/03/2015	09/04/2015	08/05/2015	08/06/2015	08/07/2015	08/08/2015	13/08/2015	08/09/2015	08/10/2015	09/11/2015	07/12/2015
Temperatura (°C) in situ	6.8	7.3	6.9	11.7	13.9	16.6	16.9	19.4	18.4	15.8	11.4	14.6	11.1
pH in situ	7.12	6.85	7.06	6.98	7.12	6.99	7.01	6.38	7.13	6.65	6.78	6.82	6.95
Conductividad (µS/cm)	257	249	241	278	233	276	311	307	255	287	378	275	267
Eh (mV)	141	132	156	115	215	-96	96	114	123	109	149	115	94
Cloruros (mg/l)	8.69	11.3	8.28	10.4	9.7	9.11	9.63	9.37	10.2	10.7	32.7	8.23	9.72
Nitratos (mg/l)	1.48	1.82	1.76	1.92	1.99	1.67	1.4	1.5	1.46	1.12	1.43	1.55	1.48
Sulfatos (mg/l)	93	90	88	106	112	95.4	111	108	112	102	86.7	101	108
Fosfatos (mg/l)	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	0.55	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20
Al (µg/l)	<5	<5	37.8	7.99	<5	<5	15.2	<5	5.8	<5	<5	<5	<5
Mn (µg/l)	61.4	79.3	90.7	82.5	24.6	40.5	61.3	71.7	104	<10	<10	11.7	12.6
Fe disuelto (µg/l)	<1	15.2	323	1.59	<1	<1	2.69	155	46.5	<1	<1	<2	<2
P total (µg/l)	12.3	10.7	7.67	4.2	4.7	8.2	5.2	17.6	14.6	19.6	9.66	7	9.9
As (µg/l)	<1	-	-	<1	-	-	<1	-	-	-	<1	-	-
Ni (µg/l)	7.72	-	-	10.2	-	-	6.52	-	-	-	5.27	-	-
Hg (µg/l)	<0.015	-	-	<0.015	-	-	<0.015	-	-	-	<0.015	-	-
Pb (µg/l)	<0.5	-	-	<0.5	-	-	<0.5	-	-	-	<0.5	-	-

Tabla 4. Resultados de los análisis químicos de las aguas del lago en el punto de rebose en diferentes muestreos realizados durante 2015 (GEAMA, 2016).

Table 4. Water chemical composition of the As Pontes pit lake overflow during 2015 (GEAMA, 2016).

cuentran por debajo de los valores máximos. Solamente en dos fechas, las concentraciones medidas superaron los límites máximos autorizados para el vertido. Estas circunstancias se produjeron en situaciones de muy bajo caudal y escasa repercusión en el río Eume.

Por último, es importante resaltar que los valores medidos de cloruros, del orden de 10 mg/l, son muy parecidos al valor medio de sistemas fluviales en Galicia y de las aguas de lluvia, lo que indica un fondo natural de las aguas del lago.

8.2. Oleaje en las orillas del lago

El oleaje previsto antes del llenado del lago coincidió con el observado al final del proceso de llenado. También, se confirmó la utilidad de la protección diseñada para proteger las orillas del lago frente a la erosión y la estabilidad de los taludes emergentes y sumergidos de la mina.

8.3. Estabilidad de los taludes

Los taludes del contorno del lago de As Pontes se mostraron estables durante el proceso de llenado, al finalizar el mismo y continúan siendo estables en la actualidad. Este era el escenario previsto antes del inicio del llenado del lago. Además, los sismógrafos instalados no registraron sismicidad inducida por el proceso de llenado del lago.

9. Obras hidráulicas realizadas

La solución adoptada para la recuperación ambiental del hueco minero como lago artificial

contemplaba reintegrar al lago los cursos de agua que en su día se derivaron para posibilitar la explotación minera, así como su desagüe a través del río Carracedo. Este río, que a su vez es afluente por la margen derecha del río Eume, antes de iniciarse la explotación minera drenaba toda el área afectada por la explotación (Rivas, 2003a). Para reintegrar al lago los cursos de agua desviados durante la explotación de la mina se proyectaron las siguientes obras hidráulicas: 1) La conducción al lago de los canales perimetrales de las escombreras exteriores, 2) Las conducciones para descargar en el lago los arroyos Meidelo e Illade situados en el borde norte del lago (Figura 8A), y 3) Un canal para el desagüe del lago que lo conecta con el cauce del río Carracedo, no alterado en su tramo final por la explotación, y que por rebose vierte al río Eume (Rivas, 2003b). En la Figura 8B se muestra el canal de desagüe del lago en su conexión con el cauce no alterado del río Carracedo.

Con las obras hidráulicas proyectadas el lago realiza un efecto regulador de los caudales y aportaciones de agua y de laminación de las avenidas por su gran capacidad de almacenamiento. En épocas de estiaje, la descarga del agua del lago se reduce y puede llegar a anularse si la evaporación supera a las aportaciones.

10. Situación actual del contorno del lago

El hueco final de la mina de As Pontes ocupaba una superficie de aproximadamente 12 km² mientras que la lámina de agua del lago a la cota de desagüe se extiende sobre 8 km². Por

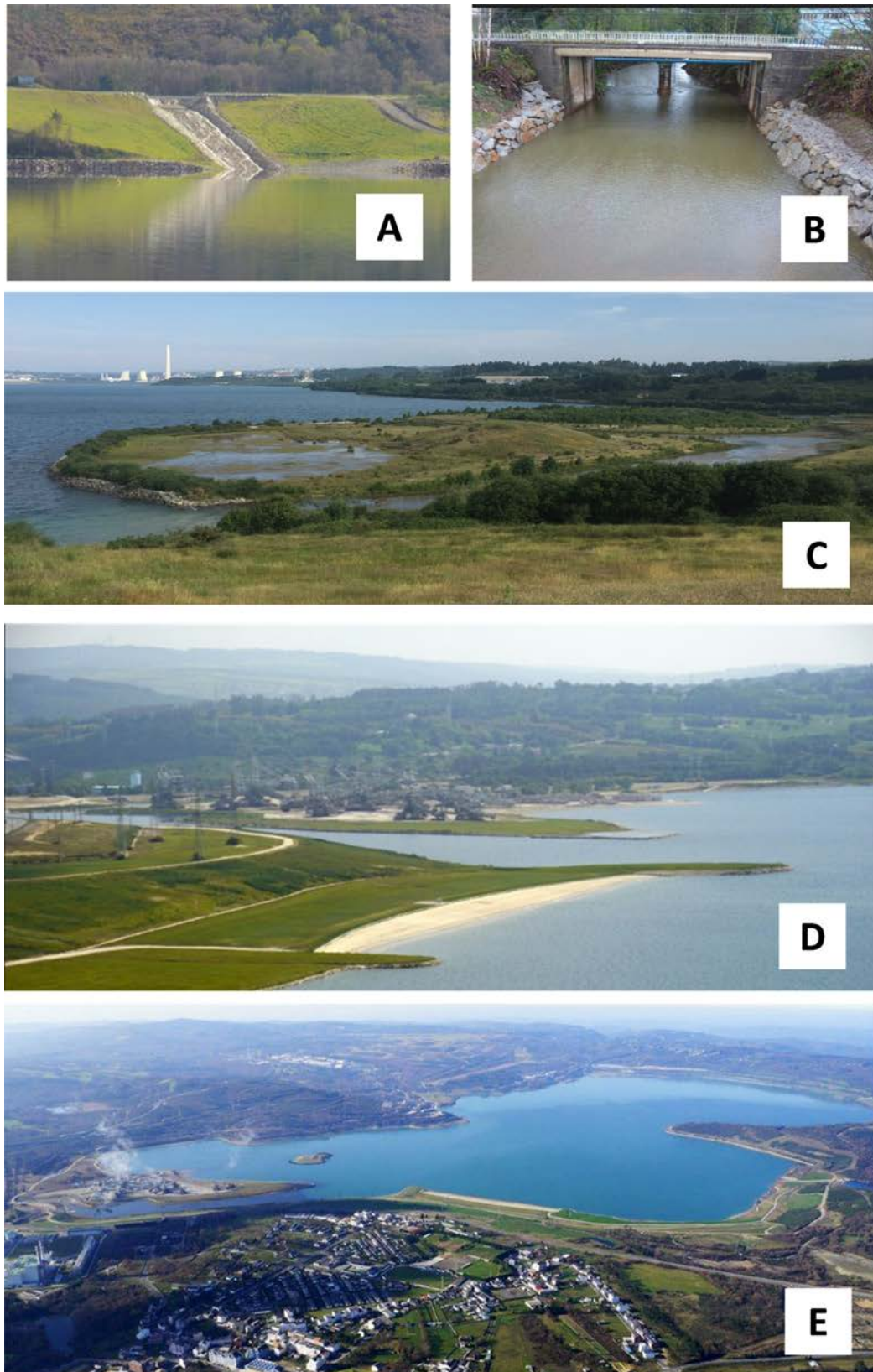


Figura 8. (A) Canal de entrada al lago del arroyo Illade. (B) Desagüe del lago de As Pontes. (C) Vista de la isla ornitológica situada en el lago de As Pontes. (D) Vista de la playa situada en el lago de As Pontes. (E) Vista general del lago de As Pontes (fotografías cortesía de Soledad Souto).

Figure 8. (A) Inflow channel of Illade stream. (B) As Pontes pit lake discharge channel. (C) View of the ornithological island located in the As Pontes pit lake. (D) View of the beach located in the As Pontes pit lake. (E) General view of the As Pontes pit lake (pictures courtesy of Soledad Souto).

tanto, para completar la restauración de todo el ámbito afectado fue necesario realizar actuaciones sobre la orla de 4 km² que bordea el lago. En su mayor parte, esta superficie se revegetó con distintas especies arbustivas y arbóreas para cuya implantación se siguieron las prácticas utilizadas con éxito en la restauración de las escombreras exteriores de la mina de As Pontes que ocupan una superficie de 12 km². Además, se realizaron las siguientes actuaciones contempladas en la evaluación de impacto ambiental de Macías *et al.* (2004): (1) La construcción de humedales para prevención de la entrada de aguas ácidas en el lago, (2) Una zona de playa (Figura 8D); y (3) Una isla ornitológica para facilitar el anidamiento de aves acuáticas (Figura 8C y 8E).

En la zona noroeste del hueco minero, y por encima de la superficie del lago se encuentran los taludes de mayor altura que lo bordean y que se excavaron en filitas y cuarzofilitas con un elevado contenido de materiales sulfurosos. Dado que el nivel freático en esta zona es muy somero, se producen filtraciones de aguas ácidas a través de la superficie de estos taludes. Para evitar la entrada al lago de estas aguas ácidas, se construyeron humedales de tratamiento pasivo de estas aguas consistentes en balsas en las que se ralentiza el flujo y se aportan materiales encalantes y materia orgánica en la que se implantan rizomas del género *Typha*.

Los taludes del contorno del lago presentan en general fuertes pendientes que dificultan la creación de hábitats para la avifauna lacustre. Aprovechando la morfología del contorno del lago en su extremo noroeste se proyectó una isla ornitológica para potenciar la colonización del ecosistema del lago creando un asentamiento adaptado para el anidamiento de avifauna y vegetación palustre, mediante la creación de un canal perimetral con el fin de separarla de la margen emergente y protegerla frente a las perturbaciones humanas. En el interior de la isla se proyectaron dos lagunas conectadas con el lago. En la Figura 8C se presenta una vista de la isla ornitológica.

En el extremo sureste del lago se proyectó una playa, como elemento disipador del oleaje y para posibilitar el baño y el fácil acceso para el desarrollo de deportes náuticos de vela y piragüismo. Las embarcaciones a motor están prohibidas en el lago. En la Figura 8D se presenta una vista de la playa.

11. Recuperación ambiental

Las áreas perimetrales del lago, así como las zonas húmedas alcanzaron un elevado grado de naturalidad con altas coberturas vegetales, dominadas por especies autóctonas: abedules, alisos y robles. Actualmente la mayoría de las comunidades han madurado e incrementado la cobertura con la incorporación de nuevas especies. Las comunidades acuáticas se han desarrollado y han aumentado gradualmente su riqueza en especies y se han convertido en ecosistemas ricos y diversos con presencia de aves invernantes, tales como el somorgullo, el cormorán, el ánade real, el pato cristado, la gaviota, la garza real y la cerceta común, así como de fauna ictiológica como la boga, la trucha común y el espinosillo. Por todo ello, se puede afirmar que el lago y su entorno, aunque todavía es un ecosistema joven, está naturalizado, es autosuficiente y tiende a una madurez razonable.

En la Figura 8E se presenta una vista general del lago que corrobora la integración del mismo en el paisaje y que supone una actuación auto-sostenible en la medida que se recupera el sistema hidrológico alterado durante la explotación de la mina que se autorregula sin necesidad de ninguna actividad adicional. Su ejecución ha supuesto para el municipio de As Pontes no sólo un lugar de recreo y baño para la población local sino también un espacio donde se desarrollan diferentes actividades náuticas de carácter local, provincial y autonómico que congregan a numerosos deportistas y aficionados, contribuyendo así al bienestar social y al desarrollo económico de la zona.

12. Conclusiones

Se han presentado los principales hitos y los aspectos limnológicos e hidrogeoquímicos más relevantes de la recuperación medioambiental del hueco final de la mina de As Pontes. Se ha presentado una visión global del planteamiento del problema, los métodos utilizados para dar respuesta a los retos, las soluciones adoptadas y los resultados alcanzados. Es importante resaltar la relevancia de la actuación coordinada de especialistas en hidrología, química de aguas ácidas, medio ambiente, hidráulica, oleaje y geotecnia para resolver con éxito el reto de la recuperación medioambiental de un antiguo hueco minero.

La metodología seguida para la recuperación del hueco de mina y su transformación en un lago

minero desde el momento del cierre de la mina de As Pontes hasta su llenado total se describe por primera vez de forma completa considerando todas las etapas realizadas: la selección del “llenado forzado”, la selección de los tipos y volúmenes de agua utilizados en el llenado, la calidad química de estas aguas, la simulación numérica de los escenarios de llenado considerados tanto con un modelo de mezcla perfecta como con un modelo de lago estratificado, el estudio del oleaje en las orillas del lago, el estudio geotécnico de la estabilidad de los taludes de la mina, el proceso del llenado, el control de la calidad química del agua del lago y las obras hidráulicas realizadas para reintegrar al lago los cursos de agua derivados por la actividad minera y el desagüe del lago.

La metodología empleada fue exitosa y las previsiones realizadas están en línea con los resultados obtenidos tanto en lo relativo al tiempo de llenado del lago como a la calidad de las aguas de rebose del mismo que cumplen con todos los límites establecidos. Es importante destacar que el modelo del flujo de agua y la calidad de las aguas del lago de As Pontes realizado mediante un modelo unidimensional, hidrodinámico, térmico y geoquímico con estratificación vertical utilizando el código DYCD-CORE reprodujo mejor el comportamiento real del lago que el modelo de mezcla perfecta realizado usando el código PHREEQC. Estos modelos fueron muy útiles para recomendar la solución final hacia el llenado rápido del lago con la máxima aportación disponible de los caudales del río Eume.

El modelo del flujo de agua y la calidad de las aguas del lago de As Pontes se utilizó para realizar predicciones de la evolución de la temperatura, salinidad y geoquímica de las aguas del lago de As Pontes durante el llenado para el plan de llenado contemplado en el proyecto de ENDESA así como para una serie de planes complementarios y/o alternativos. Los resultados de este modelo indicaron que: (1) Las aguas ácidas procedentes de las cuencas de la mina y de las escombreras exteriores tenderían a acumularse en las partes más profundas del lago por ser más salinas y por lo tanto más densas, y (2) Las aguas del río Eume, de menor contenido en sulfato y menor salinidad, se acumularían en las capas más superficiales del lago.

El control de la evolución de la calidad química de las aguas del lago de As Pontes realizado tanto en la etapa de llenado como en la fase posterior al mismo (GEAMA, 2016) confirmó que el

lago presenta durante el llenado dos capas bien diferenciadas separada por una quimioclina. La capa más superficial tiene un pH ligeramente ácido y condiciones óxicas, mientras que la capa más profunda presenta valores de pH muy bajos y condiciones anóxicas. Una vez finalizado el llenado del lago en 2012 los perfiles verticales de calidad química a diferentes profundidades realizados en los puntos de muestreo PVE de 82 m de profundidad y PVO de 192 m mostraron una capa superficial con características térmicas y químicas homogéneas de espesor menor de 40 m (GEAMA, 2016).

La creación de un lago artificial como solución para la recuperación medioambiental del hueco final de la mina de As Pontes se puede considerar como un éxito tanto desde el punto de vista paisajístico como de su uso para actividades de recreo, así como por la calidad final obtenida en las aguas del lago. Esta actuación es equiparable a las realizadas en las explotaciones de lignito existentes en Europa Central.

Agradecimientos

Francisco Rivas agradece a ENDESA SA, y en especial a José Félix Ibáñez, Director General de Minería, la confianza depositada en él para dirigir el proyecto de As Pontes. También se agradece a Aníbal Gil, Enrique Santos, Carlos Sal y Antonio Feijó por su colaboración en el proyecto, así como a Gabriel Pérez Bravo e Isabel Fraga (fallecida) que elaboraron los planos y a Miguel Colomo, Francisco Aréchaga, José Antonio Menéndez Lolo y Aníbal Gil que lo ejecutaron. También fue importante la participación en el proyecto de los equipos de consultoría y asistencia científico-técnica: I. Arnold y W. Rolland de LAUBAG, Felipe Macías de la Universidad de Santiago de Compostela, J.L. Almazán y Manuel Velasco de DM Iberia y los investigadores de los grupos de investigación AQUATERRA y GEAMA de la Universidad de A Coruña.

Referencias

Aguas de Galicia (2005). Resolución del Expediente de Solicitud de Autorización de Vertido de Aguas Residuales procedentes del rebose producido por la creación de un lago artificial en el hueco de mina de As Pontes, a petición de ENDESA Generación S.A. Fecha: 10 de agosto de 2005. Expediente Clave: DH.V15.18949.

- Almazán, J. L. (2003). Estudio de la acción del oleaje y posibles medidas protectoras en el lago final de la mina de As Pontes.
- Antenucci, J., and Imerito, A. (2002). The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model DYRESM. Science Manual. Centre for Water Research. University of Western Australia.
- Antenucci, J., and Imerito, A. (2003). The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model DYRESM. User Manual". Centre for Water Research. University of Western Australia.
- Appelo, C. A. J., and Postma, D. (1993). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, A. A. Balkema, ISBN 90 5410 105 9.
- Aréchaga, F., Ferrero, T., Gil, A., Menéndez, J.A., and Valle, R. (2011). *Riqueza Restaurada: Historia de la Mina de As Pontes*. Endesa Generación.
- Berkhoff, J. C. W., Booy, N., and Radder, A. C. (1982). Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves. *Coastal Engineering*, 6(3), 255-279. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(82\)90022-9](https://doi.org/10.1016/0378-3839(82)90022-9).
- CEE (1988). Directiva del Consejo 88/609/CEE, de 24 de noviembre de 1988, sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión.
- Dee, N., Baker, J., Drobny, N., Duke, K., Whitman, I., and Fahringer, D. (1973). An environmental evaluation system for water resource planning. *Water Resources Research*, 9(3), 523-535.
- Delgado, J., Juncosa, R., Jardón, A., González, R., and Fernández, A. (2014). Integrating pit lakes in Water Basin planning: The Meirama Brown-coal. In: *Responsible mining. Case studies in managing social and environmental risks in the developed world (Society for mining, metallurgy and exploration)*. M. Jarvie-Eggart, USA, 489-517.
- Denimal, S., Bertrand, C., Mudry, J., Paquette, Y., Hochart, M., and Steinmann, M. (2005). Evolution of the aqueous geochemistry of mine pit lakes – Blanzky-Montceau-les-Mines coal basin (Massif Central, France): origin of sulfate contents; effects of stratification on water quality. *Applied Geochemistry*, 20(5), 825-839.
- Eary, L. E. (1999). Geochemical and equilibrium trends in mine pit lakes. *Applied Geochemistry*, 14(8), 963-987.
- ENDESA (2002). Investigación hidrogeológica en la mina de Puentes. ENDESA. 2002.
- ENDESA (2003a). Anteproyecto. Mina de As Pontes. Obras hidráulicas de descarga al lago final y desagüe del lago. ENDESA. Diciembre 2003.
- ENDESA (2003b). Anteproyecto. Mina de As Pontes. Canal de llenado del hueco final. ENDESA. Diciembre 2003.
- GEAMA (2016). Evolución química del lago minero de As Pontes. Período Ene-Dic 2015. Informe Técnico. Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente. Universidade da Coruña.
- Geller, W., Klapper, H., and Schultze, M. (1998). Natural and anthropogenic sulfuric acidification of lakes. In: Geller, W., Klapper, H., Salomons, W. (Eds.). *Acidic Mining Lakes*. Springer, pp. 3-14.
- Geller, W., and Schultze, M. (2013). Treatment of in- and out-flows. In: Geller, W., Schultze, M., RLP, Kleinmann, Wolkersdorfer, C. (Eds.), *Acidic Pit Lakes – Legacies of Surface Mining on Coal and Metal Ores*. Springer, Berlin, Germany, pp. 243-256.
- Juncosa, R., Delgado, J., Cereijo, J. L., García, D., and Muñoz, A. (2018). Comparative hydrochemical analysis of the formation of the mining lakes of As Pontes and Meirama (Spain). *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 526. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6880-3>
- Juncosa, R., Delgado, J., Cereijo, J. L., and Muñoz, A. (2019). Hydrochemical Evolution of the filling of the mining lake of As Pontes (Spain). *Mine Water and the Environment*, 38(3), 556-565.
- Knoller, K., Fauville, A., Mayer, B., Strauch, G., Friese, K., and Veizer, J. (2004). Sulfur cycling in an acid mining lake and its vicinity in Lusatia, Germany. *Chemical Geology*, 204(3-4), 303-323.
- Koch, H., Kaltofen, M., Grünwald, U., Messner, F., Karkuschke, M., Zwirner, O., and Schramm, M. (2005). Scenarios of water resources management in the Lower Lusatian mining district, Germany. *Ecological Engineering*, 24, 49-57.
- Krümmelbein, J., Bens, O., Raab, T., and Naeth, M. A. (2012). A history of lignite coal mining and reclamation practices in Lusatia, eastern Germany. *Canadian Journal of Soil Science*, 92(1), 53-66.
- Langmuir, D. (1997). *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice-Hall, Inc. ISBN 0-02-367412-1.
- Lu, C., Samper, J., Fritz, B., Clement, A., and Montenegro, L. (2011). Interactions of corrosion products and bentonite: An extended multicomponent reactive transport model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36, 1661-1668. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.07.013>.
- Macías *et al.* (2004). Evaluación de Impacto Ambiental del Proceso de Llenado del Hueco de la Mina de As Pontes. Universidad de Santiago de Compostela.
- McCullough, C. D., and Schultze, M. (2018). Engineered river flow-through to improve mine pit lake and river values. *Science of the Total Environment*, 640-641, 217-231.
- McCullough, C. D., and Vandenberg, J. (2020). Studying Mine Pit Lake Systems Across Multiple Scales. *Mine Water and the Environment*, 39, 173-194.
- Medina, A. H., Lolo, J. A. M., Hernando, J. M. J., Penalver, R. M., and Encinas, J. C. A. (2017). Cuatro actuaciones ambientales en centros mineros de

- Endesa. <https://www.endesa.com/content/dam/enel-es/home/prensa/publicaciones/otraspublicaciones/documentos/Cuatro-actuaciones-ambientales.pdf>.
- Miller, G. C., Lyons, W. B., and Davis, A. (1996). Understanding the water quality of pit lakes. *Environmental Science & Technology*, 30(3), 118A-23A.
- Molinero, J., Samper, J., Zhang, G., and Yang, C. (2004). Biogeochemical reactive transport model of the redox zone experiment of the Äspö hard rock laboratory in Sweden. *Nuclear Technology*, 148, 151-165.
- Moreira, S. (2010). Coupled hydrodynamic and geochemical models for open pit lakes: application to the As Pontes pit lake. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña.
- Moreira, S., Boehrer, B., Schultze, M., Dietz, S., and Samper, J. (2011). Modeling Geochemically Caused Permanent Stratification in Lake Waldsee (Germany). *Aquatic Geochemistry*, 17, 265-280. <https://doi.org/10.1007/s10498-011-9133-4>.
- Nordstrom D. K., and Alpers, C. N. (1999). Geochemistry of acid mine waters. In Plumlee GS, Logsdon MJ, editors. *The environmental geochemistry of mineral deposits. Reviews in Economic Geology*. Littleton, CO. USA. 133-156.
- Oliva, A. O. (2015). Estabilidad de taludes y laderas. Análisis cuantitativo y cualitativo. Grupo ITEICO Euoamericano. Informe Técnico.
- Parkhurst, D. L., and Appelo, C. A. J. (1999). User's guide to PHREEQC (version 2). A Computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *Water-Resources Investigation Report 99-4259*. U.S. Geological Survey.
- Ramstedt, M., Carlsson, E., and Lovgren, L. (2003). Aqueous geochemistry in the Udden pit lake, northern Sweden. *Applied Geochemistry*, 18(1), 97-108.
- Rivas, F. (2003a). Mina de As Pontes. Canal de llenado del hueco final. ENDESA.
- Rivas, F. (2003b). Mina de As Pontes. Obras hidráulicas de descarga al lago final y desagüe del lago. ENDESA.
- Romero, J. R., Hipsey, M. R., Antenucci, J. P., and Hamilton, D. (2004). Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model: CAEDYM v2 v2.1 Science Manual. Centre for Water Research. University of Western Australia.
- Samper, J., Yang, C., Zheng, L., Montenegro, L., Xu, T., Dai, Z., Zhang, G., Lu, C., and Moreira, S. (2011). CORE^{2D} V4: A code for water flow, heat and solute transport, geochemical reactions, and microbial processes. Chapter 7 of the Electronic book *Groundwater Reactive Transport Models*. F. Zhang, G.-T. Yeh, C. Parker, and X. Shi (Ed), Bentham Science Publishers, pp 161-186, ISBN 978-1-60805-029-1.
- Samper, J., Montenegro, L., López, C., Moreira, S., Bonilla, M., Pisani, B., Álvares, D., and Yang, C. (2006). Proyecto MOD-AS PONTES. Modelo de flujo y calidad química del futuro lago de As Pontes: Recopilación y síntesis bibliográfica y análisis de viabilidad de un modelo tridimensional de flujo y calidad de las aguas del lago. Informe final de la Fase I. Universidade da Coruña. Marzo 2006.
- Samper, J., Moreira, S., Álvares, D., Montenegro, L., Lu, C., Bonilla, M., López, C., Ma, H., and Li, Y. (2008). Proyecto MOD-AS PONTES. Modelo de flujo y calidad química del futuro lago de As Pontes. Fase 2: Modelos de flujo y calidad de las aguas del lago. Informe final: I Resumen extenso. Universidade da Coruña. Febrero 2008.
- Sánchez-España, J., López-Pamo, E., Santofimia, E., Díez-Ercilla, M. (2008). The acidic mine pit lakes of the Iberian Pyrite Belt: an approach to their physical limnology and hydrogeochemistry. *Applied Geochemistry*, 23, 1260-1287.
- Sánchez-España, J., Yusta, I., Ilin, A., van der Graaf, C., and Sánchez-Andrea, I. (2020). Microbial Geochemistry of the Acidic Saline Pit Lake of Brunita Mine (La Unión, SE Spain). *Mine Water and the Environment* 39, 535-555. <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00655-0>.
- Schultze, M., Pokrandt, K.-H., and Hille, W. (2010). Pit lakes of the Central German lignite mining district: creation, morphometry and water quality aspects. *Limnologia*, 40, 148-155.
- Schultze, M., Pokrandt, K.-H., and Hille, W. (2011). Erratum to: "Pit lakes of the central German lignite mining district: creation, morphometry and water quality aspects" [*Limnologia* 40, 2010, 148-155]. *Limnologia* 41, 78.
- Schultze, M., Hemm, M., Geller, W., and Benthhaus, F.-C. (2013). Pit lakes in Germany: Hydrography, water chemistry and management. In: Geller, W., Schultze, M., RLP, Kleinmann, Wolkersdorfer, C. (Eds.), *Acidic Pit Lakes - Legacies of Surface Mining on Coal and Metal Ores*. Springer, Berlin, Germany, pp. 265-291.
- Talwani, P. (1997). On the nature of reservoir-induced seismicity. *Pure and Applied Geophysics*, 150, 473-492. <https://doi.org/10.1007/s000240050089>.
- Vattenfall (2003). Pronóstico sobre la calidad del agua del lago final de As Pontes durante la fase de llenado. Vattenfall, Germany.
- Velasco, M. (2003). Evaluación de la estabilidad final y durante el proceso de llenado con agua. Taludes de la mina de As Pontes. DM Iberia.

