

## ESTUDIOS HIDROLÓGICOS Y MODELOS DE MEZCLA DE AGUAS PARA EL ESTUDIO DEL DRENAJE ÁCIDO DEL TERRAPLÉN DEL APARRAL EN LA AUTOVÍA AG-64

J. Samper<sup>1</sup>, A. Naves<sup>1</sup>, L. Montenegro<sup>1</sup>, B. Pisani<sup>1</sup>, H. Dopico<sup>2</sup>, M. Arias<sup>2</sup> y J. Dafonte<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones Científicas Avanzadas (CICA), Escuela de Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña, Campus de Elviña s/n 15071 A Coruña. e-mail: j.samper@udc.es

<sup>2</sup>Intacta Gestión Ambiental. Edif SEARA. P.I. Penapurreira. 15320 As Pontes A Coruña. e-mail: h.dopico@intacta.es

<sup>3</sup>Universidad de Santiago de Compostela. Departamento de Ingeniería Agroforestal. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería. Benigno Ledo s/n. 27002 Lugo. e-mail: jorge.dafonte@usc.es

**RESUMEN.** Las aguas de los ríos Eume y Chamoselo, a su paso por As Pontes (A Coruña), se vieron muy acidificadas a partir de 2008 debido a los aportes de aguas ácidas que estuvieron en contacto con los estériles sulfurosos de la construcción de la autovía AG-64. Estos estériles se utilizaron como material competente y de relleno en toda la autovía. En el terraplén del arroyo del Aparral el pH natural de las aguas del arroyo se redujo desde el valor natural (6.5) hasta 2.3. Desde entonces el pH del río Chamoselo se viene corrigiendo mediante la adición de hidróxido cálcico en varios puntos de la cuenca. Esta comunicación presenta los trabajos realizados para: (1) Definir la red de drenaje actual en el entorno del terraplén del Aparral; (2) Identificar las posibles fuentes y los flujos de aguas ácidas superficiales y subterráneas y (3) Formular un modelo conceptual para la generación de las aguas ácidas y de mezcla de aguas en la zona de estudio. El objetivo final es reducir los flujos de agua a través del relleno para reducir al máximo los caudales de agua a tratar.

**ABSTRACT.** Surface waters of the Eume and Chamoselo rivers at As Pontes (A Coruña) have been severely affected by acidity episodes since 2008 due to water leaching through the sulfidic materials used for the construction of AG-64 highway. The sulfidic materials were disposed at several sites as landfills and embankments. The construction of the Aparral embankment led to a decrease of the pH of the Aparral creek from 6.5 (natural) to 2.3. Remediation measures have been implemented since then by adding calcium hydroxide in surface waters at several locations in the Chamoselo basin. Here we present the work done so far: (1) To define the drainage network in the Aparral embankment; (2) To identify and quantify the acidity sources and the water flows causing the acidity of the surface water and groundwater and (3) Formulate a conceptual model for the generation of acid and a mixing-cell model for the study area. The ultimate objective is to

reduce the water flows through the embankment in order to minimise the water treatment.

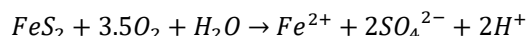
### 1.- Introducción

El drenaje ácido de rocas en la construcción de infraestructuras constituye un problema técnico y ambiental de primera magnitud. Los problemas técnicos más importantes son la corrosión de los metales y del hormigón, y la erosión de taludes debido a la ausencia de vegetación.

El drenaje ácido de rocas deteriora la calidad del agua debido a la oxidación de los sulfuros metálicos. El pH del drenaje ácido de las rocas normalmente varía entre 2 y 4 (Nordstrom y Alpers, 1999). Muchos metales se convierten en solubles en condiciones ácidas. Los minerales piríticos se oxidan cuando son expuestos al aire y provocan el drenaje ácido de rocas. Los principales metales causantes del drenaje ácido de rocas son la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), la marcasita (otra forma de  $\text{FeS}_2$ ), y la pirrotita ( $\text{Fe}_x\text{S}$ ).

La meteorización de la pirita empieza con la exposición de la pirita al oxígeno y al agua. La pirita es menos reactiva si está sumergida en agua. En general, el drenaje ácido es producido por la exposición de las rocas piríticas a ciclos repetidos de humectación/desecación y a la acción de las bacterias presentes en la superficie de la tierra. (Hammastron et al., 2005).

La reacción inicial de oxidación de la pirita es:



Posteriormente, el hierro ferroso se oxida a hierro férrico por acción de las bacterias. Este hierro férrico es un potente oxidante que ataca a la pirita y a otros minerales, liberando notables cantidades de hierro ferroso (Hammastron et al., 2005).

Los efectos ambientales de los drenajes ácidos son muy negativos sobre la calidad del agua y los organismos acuáticos (Orndorff y Daniels, 2004). Para abordar estos problemas, se han elaborado guías para la gestión de terrenos sulfurosos en Estados Unidos, Australia y Canadá (Orndorff y Daniels, 2004; NSW, 2005).

En el año 2008 se inauguró el tramo As Pontes de García Rodríguez-Cabreiros de la autovía AG-64 (Ferro-Villalba). Durante la construcción de este tramo se excavó en la zona de "Os Airios" una trinchera de dimensiones considerables con una profundidad máxima de 50 m. De esta trinchera se extrajo un volumen de 1.8 hm<sup>3</sup> de pizarras

Citar como: Samper J., Naves A., Montenegro L., Pisani B., Dopico H., Arias M. y Dafonte J. (2021): "Estudios hidrológicos y modelos de mezcla de aguas para el estudio del drenaje ácido del terraplén del Aparral en la autovía AG-64", en Samper F.J., Paz A., Dafonte J. y Vidal E., eds., *Estudios en la Zona No Saturada del Suelo, Vol. XV. A Coruña, 9-10 noviembre 2021*, pp. 133-141. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498210>



con contenidos variables de minerales piríticos. Una parte de este material se utilizó como relleno en un vertedero y en el polígono de “Os Airios” situados en As Pontes. El resto de este material se utilizó como relleno y como material competente en la base de todo el trazado de este tramo de 9.7 km de autovía.

Las aguas de los ríos Eume y Chamoselo se vieron muy acidificadas a partir de entonces debido a la escorrentía superficial y subterránea procedente de los materiales de relleno y saneo utilizados en la construcción de la autovía. Estos vertidos ácidos, procedentes del drenaje ácido de rocas, afectan a la cuenca del río Chamoselo principalmente a través de dos de sus afluentes: el arroyo del Aparral y el arroyo Lavadoiro. El río Chamoselo es a su vez afluente del río Eume. Para neutralizar la acidez del río Chamoselo se controla en continuo el pH en la cuenca en 35 puntos y se vierten 400 t/año de hidróxido cálcico en 7 puntos de dosificación.

En la Fig. 1 se muestra la situación de la cuenca del río Chamoselo y del terraplén del Aparral, en el citado tramo de la autovía.

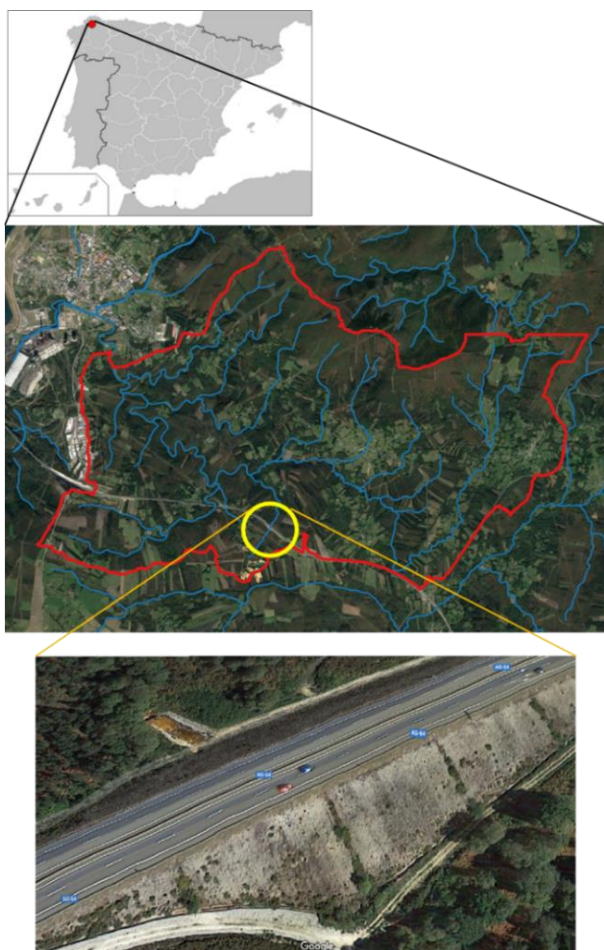


Fig. 1. Situación de la cuenca del río Chamoselo y del terraplén del Aparral.

En la construcción del terraplén del Aparral se utilizó como material de relleno el material excavado de la trinchera de “Os Airios”. Una vez finalizada la obra del

terraplén sus taludes fueron impermeabilizados. Sin embargo, el nivel freático en la zona está muy próximo a la superficie por lo que los materiales del relleno pueden ser lavados por el flujo de aguas subterráneas. La construcción del terraplén del Aparral provocó que el pH natural del arroyo del Aparral (en torno a 6.5) bajara a un pH de alrededor de 2.3. Dafonte et al. (2019) presentaron un primer análisis de las fuentes de acidez y de los flujos de agua causantes de las aguas ácidas.

En esta comunicación se presentan los trabajos realizados más recientemente para: (1) Definir la red de drenaje actual en el entorno del terraplén del Aparral; (2) Identificar de forma más precisa las fuentes de acidez y los flujos de aguas ácidas superficiales y subterráneas y (3) Formular un modelo conceptual para la generación de las aguas ácidas y un modelo de mezcla de aguas en la zona de estudio. El objetivo final es reducir los flujos de agua a través de zonas con rellenos piríticos para minimizar los caudales de agua a tratar.

## 2.- Descripción de la zona de estudio

El terraplén del Aparral tiene ~0,5 km de longitud, un ancho de ~30 m en coronación y una altura máxima de ~30 m en su parte central. El tramo cuenta con dos vías de servicio situadas los pies de los dos taludes. Las cunetas de las vías de servicio recogen la escorrentía de los taludes y del terreno adyacente.

La red de drenaje de la zona de estudio se ha obtenido a partir del modelo digital del terreno (MDT) de 5x5 m<sup>2</sup> de resolución, disponible en la web del Instituto Geográfico Nacional, y de observaciones de campo. El terraplén se sitúa sobre la traza del arroyo del Aparral y la de su afluente. Se construyeron dos obras de drenaje transversal (ODT) mediante conducciones de hormigón para facilitar el tránsito de la escorrentía superficial de ambas corrientes de agua. No obstante, la construcción del terraplén alteró las condiciones de flujo de agua, la escorrentía superficial y los flujos subsuperficial y subterráneo.

La Fig. 2 muestra un esquema de la red de drenaje actual sobre una foto aérea de la zona de estudio. El arroyo del Aparral está entubado aguas arriba del terraplén, atraviesa la vía de servicio, recorre por dentro de la entubación la obra de drenaje transversal (ODT) y una zona en la que existe un tratamiento pasivo y, fuera de la entubación, continúa su curso aguas abajo.

La adición de cal al arroyo se realiza en la entubación aguas arriba del terraplén. El afluente del arroyo del Aparral debería cruzar la vía de servicio por una entubación y atravesar el terraplén a través de la ODT. Sin embargo, la entubación no funciona correctamente y el agua se acumula en el margen de la vía de servicio, discurre por la cuneta 1 y desagua en el arroyo del Aparral.

Las cunetas 3, 4 y 5, situadas aguas arriba del terraplén, y las cuentas 6 y 7, situadas aguas abajo del terraplén,

recogen la escorrentía de los taludes y los rezumes observados en el pie de los taludes después de los episodios de precipitaciones (Fig. 2). El agua recogida por las cunetas 4 y 5 atraviesa el terraplén a través de la ODT del arroyo del Aparral (por fuera de la entubación del arroyo) y desagua en el tratamiento pasivo existente. El agua recogida por la cuneta 3 atraviesa el terraplén a través de la ODT del afluente del arroyo del Aparral y, junto con el agua recogida en la cuneta 6, discurre por la cuneta 7 hasta el tratamiento pasivo. El caudal que atraviesa el tratamiento pasivo desagua en el arroyo del Aparral. La escorrentía superficial de la vía de servicio y de del terreno adyacente que se recoge en la cuneta 8 desagua directamente en el arroyo del Aparral aguas abajo del tratamiento pasivo.

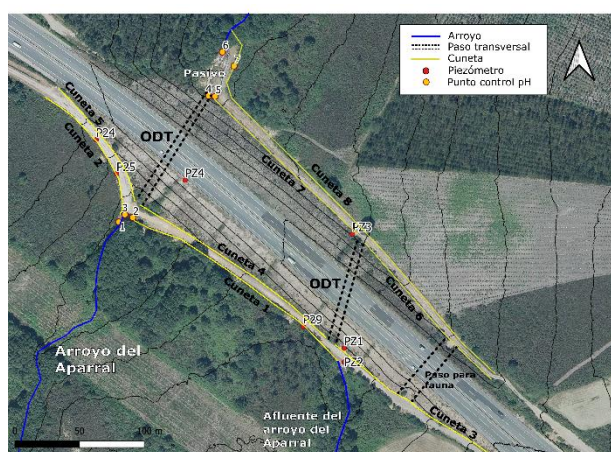


Fig. 2. Esquema de la red de drenaje actual sobre fotografía aérea de la zona de estudio en la que se muestran las curvas de nivel cada 5 m. Incluye los arroyos, las cunetas de las vías de servicio, las obras de drenaje transversal (ODT) y la posición de los piezómetros de control y los puntos de control de pH en aguas superficiales.

### 3.- Trabajos de campo y datos disponibles

#### 3.1. Aforos

Se instalaron dos aforadores de tipo RBC (Clemmens et al., 1984) para la medida del caudal del arroyo del Aparral. El aforador situado aguas arriba del terraplén mide el caudal del arroyo antes de su entubación. El régimen de caudales del arroyo está muy modificado por los trabajos de explotación de varias graveras excavadas en la cabecera del arroyo. El aforador situado aguas abajo del terraplén (Fig. 3) mide los caudales de escorrentía procedentes del terraplén y de las cunetas del pie de los taludes del terraplén.

Se dispone de datos de aforo desde mayo de 2019 hasta mayo de 2020. La serie de datos es reducida y presenta lagunas ya que en algunas fechas los caudales del arroyo excedieron los rangos de medida de los aforadores ( $85 < Q < 0.71 \text{ L/s}$ ).

#### 3.2. Construcción de piezómetros

En octubre de 2019 se perforaron 4 nuevos piezómetros (PZ1 a PZ4) que complementan la red existente en la zona de estudio. La situación de dichos piezómetros se muestra en la Fig. 2. El piezómetro PZ1, de 5 m de profundidad, está situado aguas arriba del terraplén, en el pie del talud cerca del afluente del arroyo del Aparral. El piezómetro PZ2, de 10 m de profundidad, está situado también aguas arriba del terraplén, en la cuneta exterior de la pista de acceso a la autovía y cerca del afluente del arroyo. El piezómetro PZ3, de 5 m de profundidad, está situado aguas abajo del terraplén cerca de la salida de la ODT del afluente. Por último, el piezómetro PZ4, de 30 m de profundidad, se perforó en la plataforma de la autovía AG-64 coincidiendo aproximadamente con la vertical del arroyo del Aparral.

La perforación de los piezómetros se realizó con recuperación de testigo. La información litológica de las columnas de los piezómetros permitió definir la litología del sustrato geológico y mejorar la definición del modelo conceptual del terraplén.



Fig. 3. Aforador tipo RBC instalado aguas abajo del terraplén.

#### 3.3. Datos piezométricos

Se dispone de una red de control de 18 piezómetros en el entorno de la zona, de los cuales los piezómetros P24, P25 y P29 se encuentran en el terraplén del Aparral (Fig. 2) y los piezómetros P30, P32 y P33 se encuentran en un área de descanso próxima. Se cuenta con datos de niveles medidos en estos piezómetros mensualmente entre abril de 2016 y noviembre de 2018, entre junio y octubre de 2019 y entre diciembre de 2019 y noviembre de 2020. En este último periodo se incorporaron a la red de control los piezómetros PZ1, PZ2 y PZ3. Se dispone además de datos recogidos durante los trabajos de campo en el entorno del terraplén (piezómetros P24, P25, P29, PZ1, PZ2 y PZ3) en octubre de 2019 y entre septiembre y noviembre de 2020. Las restricciones de acceso a la plataforma de la autovía no permiten de momento el seguimiento de niveles en el piezómetro PZ4.

#### 3.4. Datos de pH y calidad química de las aguas

Se dispone de datos de pH medidos in situ en muestras de

aguas subterráneas tomadas de los piezómetros de la red de control mensualmente entre abril de 2016 y noviembre de 2018, entre junio y octubre de 2019 y entre diciembre de 2019 y noviembre de 2020. Los piezómetros perforados en octubre de 2019 (PZ1 a PZ3) se incorporaron a la red a partir de 2019.

Se dispone de datos de pH de las aguas superficiales en 7 puntos de control que incluyen (Fig. 2): (1) El arroyo del Aparral aguas arriba de la zona de estudio; (2) La cuneta 1 antes del punto de vertido al arroyo; (3) El arroyo del Aparral antes de entrar en la entubación y una vez ha recibido el flujo de la cuneta 1; (4) La ODT del arroyo del Aparral; (5) La cuneta 7 a su llegada a la zona de pasivación; (6) El aforador situado aguas abajo del terraplén en la zona de pasivación; y (7) La cuneta externa de la pista de acceso aguas abajo del terraplén. Se dispone de datos semanales en estos puntos entre febrero y diciembre de 2020 y mensuales entre octubre de 2019 y febrero de 2020.

Para la diferenciación y la caracterización de los diferentes flujos de agua superficiales se han realizado 3 campañas de medidas in situ del pH, la temperatura y la conductividad eléctrica del agua en puntos situados en la zona de estudio. La primera campaña se realizó en octubre de 2019 y se realizaron medidas en 13 muestras de agua superficial tomadas en las cunetas aguas arriba del terraplén, en ambos arroyos y en muestras de aguas subterránea tomadas en los piezómetros P24, P25, P29 y PZ1 a PZ4. En septiembre de 2020 se realizó la una segunda campaña con medidas en muestras de agua superficial tomadas en 16 puntos situados aguas abajo del terraplén, incluyendo cunetas, la zona de pasivación y el arroyo del Aparral. Por último, se realizó una tercera campaña en octubre de 2020 con medidas en 25 puntos de agua superficial aguas arriba y aguas abajo del terraplén y en muestras de aguas subterránea de los 7 piezómetros.

En septiembre de 2020 se realizó una campaña de toma de muestras de agua para la realización de análisis químicos completos en los piezómetros P24, P25, P29 y PZ1 a PZ4, situados en el terraplén del Aparral, en los piezómetros P30 y P32, situados en el área de descanso cercana de la AG-64, y en los 7 puntos de control de pH de aguas superficiales. En noviembre de 2020 se repitieron los análisis en los 7 puntos de seguimiento de pH y en 4 de los 10 piezómetros (P24, PZ1, PZ2 y PZ3) y se tomó una muestra adicional en el arroyo del Aparral aguas abajo de la zona de estudio.

## 4.- Resultados

### 4.1. Aforos

La Fig. 4 muestra los caudales medidos en los aforadores instalados aguas arriba y aguas abajo del terraplén. Los periodos sin datos (como el estiaje de 2019) corresponden a registros fuera del rango de medida (entre 0.71 y 85 L/s).

En el aforador de aguas arriba el caudal medio en el periodo de medidas es igual a 17 L/s. La recta de regresión

entre los caudales medidos en ambos aforadores muestra que el caudal del aforador instalado aguas arriba del terraplén es 2.36 veces el caudal medido en el aforador instalado aguas abajo.

### 4.2. Piezometría

La evolución temporal de los niveles medidos en los piezómetros muestra que los niveles varían a lo largo del año siendo mínimos en verano y al comienzo del otoño y máximos en invierno. Los rangos de variación del nivel son menores de 5 m.

Se ha elaborado el mapa de isopiezas en régimen estacionario de la zona de estudio en su situación actual a partir de los datos piezométricos disponibles y teniendo en cuenta los dos cauces existentes y la topografía (Fig. 5). Existen flujos subterráneos desde el terreno natural situado aguas arriba del terraplén y en la margen derecha del arroyo del Aparral hacia el terraplén. No se puede definir con precisión la dirección del flujo subterráneo en los rellenos situados aguas arriba del terraplén y en la margen izquierda del arroyo. El flujo en esta zona que podría dirigirse en parte al terraplén y en parte hacia el arroyo del Aparral. Existen también flujos subterráneos desde el terreno natural aguas abajo del terraplén hacia el terraplén. El flujo subterráneo entra en el terraplén por su base y posiblemente circula hacia el arroyo en dirección aproximadamente perpendicular a la traza del arroyo.

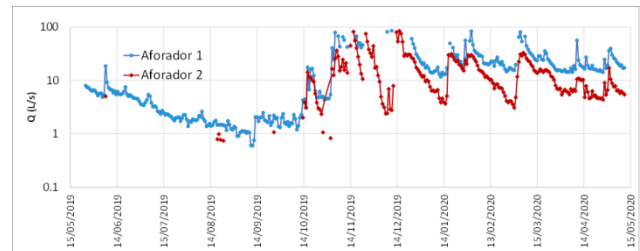


Fig. 4. Caudales medidos en el aforador situado aguas arriba del terraplén (aforador 1) y aguas abajo del terraplén (aforador 2). Los periodos sin datos corresponden a datos fuera del rango de medida.

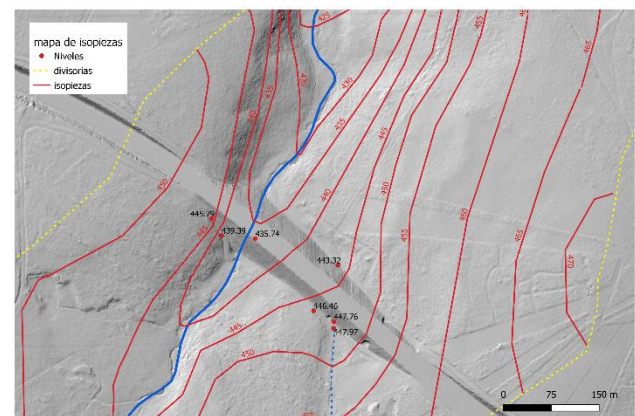
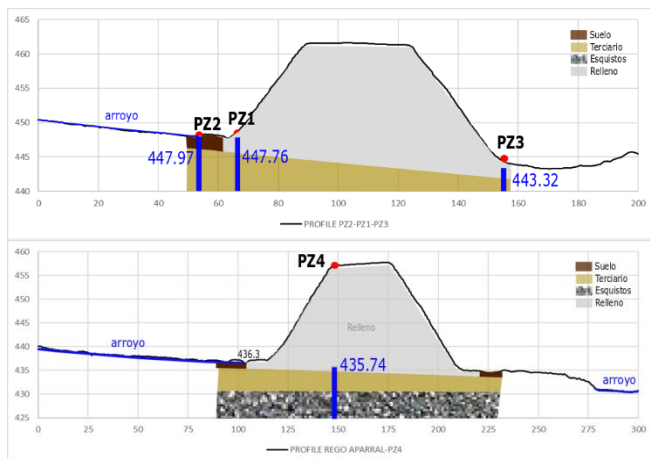


Fig. 5. Mapa de isopiezas en régimen estacionario de la zona de estudio.

Los posibles flujos subterráneos incluyen, además del flujo a través del material existente por debajo del

terraplén, el drenaje del propio terraplén y los flujos desde el medio subterráneo subyacente hacia el relleno del terraplén y desde el relleno del terraplén hacia el medio subterráneo subyacente.

La Fig. 6 muestra los niveles piezométricos medios a lo largo de dos perfiles transversales del terraplén. Uno de los perfiles va desde el afluente del arroyo del Aparral hasta el otro extremo del terraplén y discurre a lo largo de los piezómetros PZ2, PZ1 y PZ3. El otro perfil discurre aproximadamente a lo largo del cauce del arroyo del Aparral, atraviesa el terraplén en la zona de mayor altura, pasa por el piezómetro PZ4 y continúa a lo largo del arroyo aguas abajo del terraplén.



**Fig. 6.** Perfiles transversales del terraplén en los que se indican: (1) la posición de los piezómetros, (2) las litologías en el terraplén, (3) los arroyos que discurren paralelos al perfil y (3) los niveles piezométricos medios medidos. El perfil superior parte del afluente del arroyo del Aparral y atraviesa el terraplén pasando por los piezómetros PZ2, PZ1 y PZ3. El perfil inferior discurre aproximadamente a lo largo del cauce del arroyo del Aparral, atraviesa el terraplén en la zona de mayor altura, pasa por el piezómetro PZ4 y continúa a lo largo del arroyo aguas abajo del terraplén.

La composición litológica del terraplén se ha estimado a partir de las columnas estratigráficas de los piezómetros. Debajo del relleno del terraplén se encuentra una capa de depósitos terciarios y, por debajo de esta capa, se encuentran los esquistos, muy alterados en los primeros 3-5 m y progresivamente menos alterados y fracturados con la profundidad.

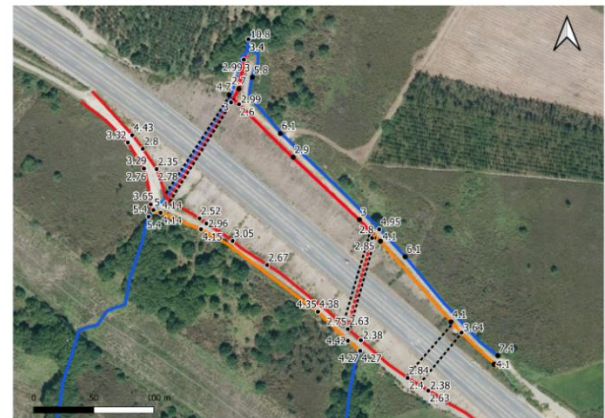
El nivel piezométrico medido en el piezómetro PZ2 es mayor que el medido en el PZ1 y ambos son significativamente mayores que el nivel medido en el PZ3. En la zona de los piezómetros PZ1 y PZ2, el flujo subterráneo en el contacto del terraplén con el terreno natural se dirige desde el terreno natural hacia el terraplén. El mapa de isopiezas elaborado confirma esta dirección de flujo en toda la margen derecha del arroyo del Aparral.

Los niveles piezométricos medidos en los piezómetros perforados en el relleno del terraplén (PZ1, PZ3 y PZ4) se encuentran muy próximos a la base del terraplén. Estos datos son posiblemente indicativos de que la infiltración de agua en el terraplén por la cumbre o por

los taludes es de pequeña magnitud. No obstante, esta conclusión debe ser confirmada mediante el seguimiento en continuo de los niveles piezométricos en el sondeo PZ4 y el análisis de la evolución del nivel piezométrico en el relleno durante y después de los episodios de precipitaciones.

#### 4.3. pH

Los datos de pH medidos in situ en muestras de agua superficiales de la zona de estudio han permitido clasificar los diferentes flujos identificados en función de su grado de acidez en: aguas ácidas, aguas ligeramente ácidas y aguas neutras o muy ligeramente ácidas (Fig. 7).



**Fig. 7.** Valores de pH medidos en aguas superficiales en las campañas de campo de 2019 y 2020. Se han identificado los diferentes flujos clasificándolos según su grado de acidez: rojo para las aguas más ácidas, naranja para las aguas ligeramente ácidas y azul para las aguas neutras o muy ligeramente ácidas.

Las aguas del afluente del arroyo del Aparral tienen un pH de 4.3 y al llegar a la pista de servicio situada aguas arriba del terraplén circula por su cuneta (cuneta 1), en la que el pH varía entre 4,1 y 4,4. Se trata de aguas ligeramente ácidas. En el arroyo del Aparral el pH es 5.4 aguas arriba de la zona de estudio y 5 en el aforador situado aguas arriba del terraplén (después del punto de confluencia del arroyo con el agua proveniente de su afluente a través de la cuneta 1). Se trata de aguas muy ligeramente ácidas. Las cunetas interiores de la pista de servicio situada aguas arriba del terraplén (cunetas 3, 4 y 5) recogen la escorrentía del terraplén y también un flujo de agua muy ácida (pH = 2,4) que rezuma en el pie del talud del terraplén. A lo largo de estas cunetas el pH varía entre 2,4 y 3 (aguas ácidas). Por la cuneta 2 también circulan aguas ácidas con pH entre 2,8 y 3,7. El agua que circula por la cuneta del pie del talud de la pista de servicio situada aguas abajo del terraplén (cunetas 6 y 7) es ligeramente ácida hasta la ODT del afluente (pH entre 3,6 y 4,1) y ácida (pH entre 2,6 y 3) una vez que recibe el flujo ácido que pasa por dicha ODT. Los flujos ácidos pasan por el tratamiento pasivo que no funciona correctamente. El pH medido en el aforador instalado aguas abajo del terraplén es ~3.

Aguas abajo de la zona de estudio el pH es igual a 3,4 en periodos en los que no se añade cal y es igual a 10,8 cuando se está añadiendo cal.

Se dispone de datos de la evolución temporal del pH en 7 puntos de control de la calidad de las aguas superficiales (Fig. 8) y en los piezómetros P24, P25, P29, PZ1, PZ2 y PZ3.

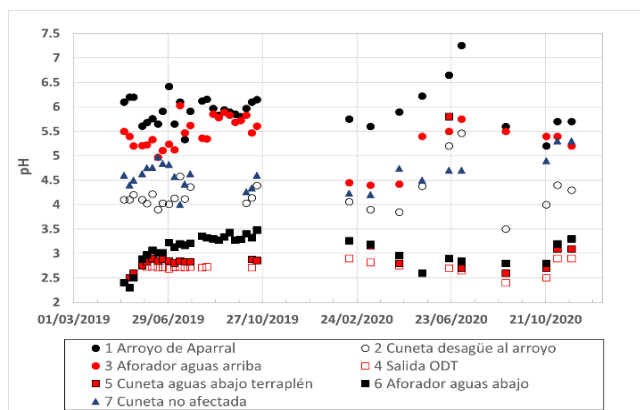


Fig. 8. Evolución temporal del pH medido in situ en 7 puntos de control de la calidad de las aguas superficiales (Fig. 2).

Las aguas subterráneas en los piezómetros P24 y P25 son ácidas con valores de pH entre 2,4 y 3,2. En el PZ29 las aguas son ligeramente ácidas con un pH en torno a 4. Los valores medidos del pH en los piezómetros PZ1 a PZ4 varían generalmente entre 2,8 y 3,9.

#### 4.4. Identificación de los tipos de aguas

Se han analizado los datos hidroquímicos y de pH medidos en los piezómetros, en los puntos de control periódico de calidad de las aguas superficiales y en las campañas de campo en el arroyo del Aparral, en su afluente, en las cunetas, las ODT y las corrientes de aguas. El análisis de estos datos ha permitido: 1) Identificar dos tipos de aguas (las aguas naturales y las aguas de drenaje de rocas ácidas o agua ácidas); 2) Definir las características químicas y la composición química de las aguas naturales y de las aguas ácidas y 3) Identificar de forma preliminar las partes del terraplén que contienen aguas ácidas.

Los dos tipos de aguas se han obtenido del análisis de los valores medidos de pH en los puntos de control periódico de calidad de las aguas superficiales durante los años 2019 y 2020. El agua natural se corresponde con el agua del arroyo del Aparral (punto 1 en Fig. 2). El agua ácida se corresponde con el agua que sale por la ODT principal (punto 4 en Fig. 2). Las composiciones químicas de los dos tipos de aguas se muestran en la Tabla 1.

El análisis de estos datos indica que las principales diferencias se encuentran en el pH, la conductividad eléctrica y las concentraciones de calcio, magnesio, litio, sulfato, hierro disuelto, aluminio disuelto, manganeso disuelto y en los metales disueltos (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Se, Sr y Zn). Las aguas ácidas del terraplén

del Aparral se caracterizan por presentar valores bajos de pH (2.6-2.8), valores altos de conductividad eléctrica (1914-2710  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), elevadas concentraciones de sulfato, calcio, magnesio, litio,  $\text{Fe}_{\text{dis}}$ ,  $\text{Al}_{\text{dis}}$  y  $\text{Mn}_{\text{dis}}$ , así como de los metales disueltos. Hay que indicar que las concentraciones medidas de metales disueltos en el agua natural están siempre por debajo del límite de detección de la técnica analítica utilizada. Se han representado en un diagrama de Piper (Fig. 9) los valores medidos de las concentraciones de aniones y cationes mayoritarios obtenidos en las analíticas completas de las muestras de los puntos de control de calidad de las aguas superficiales y de 9 muestras de agua subterránea de los piezómetros. En el diagrama de Piper se aprecia que todos los puntos están situados a lo largo de una línea recta entre el agua ácida (4) y el agua natural (1). Por tanto, se confirma que las muestras de agua del terraplén son el resultado de la mezcla de los tipos de aguas.

Tabla 1. Comparación de la composición química del agua natural y ácida en las muestras de agua superficial tomadas en septiembre y noviembre de 2020.

Parámetros	Agua natural	Agua ácida	Parámetros	Agua natural	Agua ácida
pH	5.4-4.7	2.8-2.6	COT (mg/L)	1.8	7
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	38-49	1914-2710	$\text{Fe}_{\text{dis}}$ (mg/L)	0.048	286.1
T ( $^{\circ}\text{C}$ )	14.8-8.4	15.4-9.4	$\text{Al}_{\text{dis}}$ (mg/L)	0.070	121.0
$\text{Na}^+$ (mg/L)	4.0	5.7	$\text{Mn}_{\text{dis}}$ (mg/L)	0.010-0.020	8.3-8.9
$\text{K}^+$ (mg/L)	<1.0	3.0	$\text{As}_{\text{dis}}$ ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	<0.5	2.8
$\text{Ca}^{+2}$ (mg/L)	<0.5	54	$\text{Cd}_{\text{dis}}$ ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	<0.024	2.1
$\text{Mg}^{+2}$ (mg/L)	0.74	47	$\text{Cr}_{\text{dis}}$ ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	<5.0	11
$\text{Li}^+$ (mg/L)	<10	110	$\text{Cu}_{\text{dis}}$ ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	<1.0	49
$\text{Cl}^-$ (mg/L)	8	8	$\text{Hg}_{\text{dis}}$ ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	<0.015	<0.015
$\text{SO}_4^{-2}$ (mg/L)	0.9	1596	$\text{Ni}_{\text{dis}}$ ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	<1.2	573
$\text{HCO}_3^-$ (mg/L)	<25	<25	$\text{Pb}_{\text{dis}}$ ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	<0.36	1.4
$\text{NO}_3^-$ (mg/L)	0.8	1.8	$\text{Se}_{\text{dis}}$ ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	<0.3	8
$\text{PO}_4^{-2}$ (mg/L)	<0.05	<0.05	$\text{Sr}_{\text{dis}}$ ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	<10	191
Amonio (mg/L)	1.8	7	$\text{Zn}_{\text{dis}}$ ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	<9	992

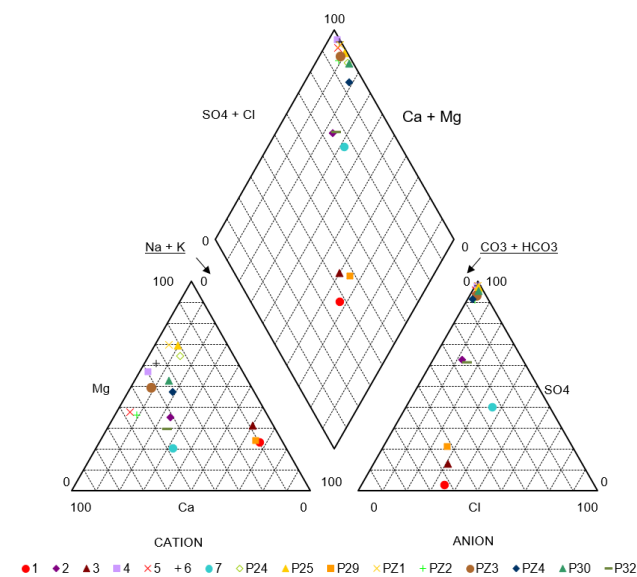


Fig. 9. Diagrama de Piper de las muestras tomadas en septiembre de 2020 en los 7 puntos de seguimiento de la calidad del agua superficial (ver Fig. 2) y las muestras de los piezómetros de la red de control.

Las principales zonas del terraplén y sus alrededores en las que se han detectado aguas ácidas incluyen: 1) Una zona de rellenos situada aguas arriba del terraplén en la margen izquierda del arroyo del Aparral. Esta zona ha sido atravesada por los piezómetros P24 y P25 que presentan aguas muy ácidas; 2) Los pies y las cunetas de los taludes norte y sur del terraplén; 3) La base del terraplén que aporta aguas ácidas como las que se recogen en la ODT del arroyo del Aparral que atraviesa el terraplén a lo largo del antiguo cauce del arroyo y las que se han registrado en los piezómetros PZ1 y PZ3. Además, pueden existir otras zonas de aporte de aguas ácidas de menor entidad asociadas a los rellenos exteriores situados en los alrededores del terraplén. Estas zonas se han detectado en los piezómetros P29 y PZ2. Hay que tener en cuenta que los caminos de servicio de la autovía situados aguas arriba y aguas abajo del terraplén se construyeron sobre rellenos que pueden contener estériles sulfurosos. Existen incertidumbres considerables sobre la extensión superficial y la cantidad de estériles sulfurosos en los rellenos del terraplén del Aparral.

También, existen incertidumbres sobre la procedencia del agua ácida que brota en el pie del talud y que discurre por las cunetas. Este flujo de agua podría provenir de la infiltración del agua de lluvia en el terraplén ya sea en su coronación o en los taludes. Aunque los taludes están dotados de estructuras de impermeabilización, no se puede descartar que el agua drenada por el material impermeabilizante se acumule en el pie del talud y penetre en los rellenos del terraplén a través del terreno natural. Tampoco se puede descartar que exista una entrada de flujo subterráneo en los rellenos del terraplén.

### 5.- Modelo de generación de las aguas ácidas y de mezcla de aguas en el terraplén

Se ha formulado un modelo conceptual para la generación de las aguas ácidas en el terraplén del Aparral basado en las siguientes hipótesis:

- 1) La existencia de dos tipos básicos de aguas ("end members"): las aguas naturales y las aguas drenaje ácido de rocas con sulfuros. Se supone que la composición química de una determinada muestra de agua del terraplén es el resultado de la mezcla de los dos anteriores tipos de agua. Cuanto mayor es la fracción de agua ácida de una muestra,  $\alpha$ , mayor es el deterioro de su calidad química.
- 2) La existencia de reacciones químicas debidas a las interacciones de las aguas con las fases minerales de los rellenos que pueden dar lugar a cambios de pH y a la disolución/precipitación de fases minerales.
- 3) Las aguas que circulan a través de los estériles sulfurosos alcanzan condiciones de acidez con valores de pH comprendidos entre 2,4 y 2,8

En una determinada sección de una corriente de agua por la que circula un caudal total  $Q_t$  se supone que dicha corriente es la mezcla de: (1) Un caudal  $Q_n$  de agua natural con una concentración  $C_n$ ; y (2) Un caudal  $Q_a$  de agua de drenaje ácido con una concentración  $C_a$ . La aplicación del principio de conservación de la masa de agua y de solutos establece que:

$$Q_n + Q_a = Q_t \quad (1)$$

$$Q_n C_n + Q_a C_a = Q_t C_m \quad (2)$$

donde  $C_m$  es la concentración del agua de mezcla. Dividiendo la Ec. 2 por  $Q_t$  se obtiene:

$$C_m = (1 - \alpha) C_n + \alpha C_a \quad (3)$$

donde  $\alpha$  es la fracción de mezcla del agua ácida y  $(1 - \alpha)$  es la fracción de mezcla de agua natural.

$$\alpha = Q_a/Q_t \quad (4)$$

$$1 - \alpha = Q_n/Q_t \quad (5)$$

La Ec. 3 permite calcular la concentración de la mezcla,  $C_m$ , a partir de la fracción de mezcla  $\alpha$  y de las concentraciones del agua natural,  $C_n$ , y del agua ácida,  $C_a$ .

Si se dispone de datos químicos de varias muestras de agua, por ejemplo, 3, para cada una de ellas se puede plantear una ecuación similar a la Ec. 3:

$$C_{m1} = (1 - \alpha_1) C_n + \alpha_1 C_a \quad (6.1)$$

$$C_{m2} = (1 - \alpha_2) C_n + \alpha_2 C_a \quad (6.2)$$

$$C_{m3} = (1 - \alpha_3) C_n + \alpha_3 C_a \quad (6.3)$$

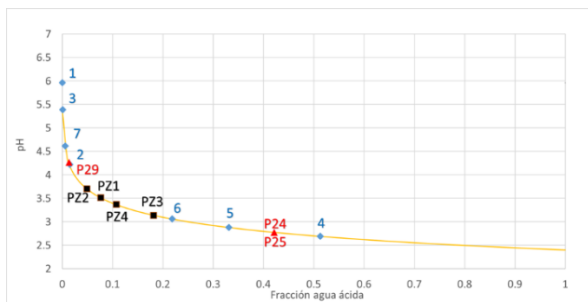
El pH se puede calcular a partir de la concentración de protones, suponiendo que la actividad del protón coincide con su concentración:

$$\text{pH} = - \log (C_m) \quad (7)$$

A partir de las Ecuaciones 3 y 7 se puede establecer una línea de mezcla que relaciona la fracción de agua ácida con el pH de la mezcla, conocidos los valores del pH del agua natural y del agua ácida. La Fig. 10 presenta la línea de mezcla de un agua natural de pH = 5,4 (igual al pH del arroyo del Aparral aguas arriba de la zona de estudio) con un agua ácida de pH = 2,4 (igual al mínimo pH medido en campo) que relaciona la fracción de agua ácida,  $\alpha$ , con el pH de la mezcla. La línea de mezcla indica que la mezcla del agua natural con una pequeña fracción de agua ácida conduce a una disminución notable de su pH. Por ejemplo, el pH desciende de 5,4 a 4 sólo con un 2% de aporte de agua ácida. Esta línea de mezcla apenas es sensible al pH del agua natural, pero es muy sensible al pH del agua ácida.

Se han calculado las fracciones de mezcla de agua ácida,  $\alpha$ , a partir de los valores medios del pH medidos en los 7 puntos de seguimiento de la calidad del agua en aguas superficiales y en los 7 piezómetros situados en el terraplén. El agua muestreada en el aforador de aguas arriba del terraplén (punto 3) es el resultado de la mezcla del agua natural del arroyo del Aparral (punto 1) y de un agua ligeramente ácida que llega al arroyo por la cuneta 1

(punto 2). El agua que sale por la ODT del arroyo del Aparral, que recoge el flujo procedente del interior del terraplén y el agua de las cunetas 4 y 5, es muy ácida ( $\alpha = 51,3\%$ ). La muestra de agua recogida en la cuneta del pie del talud norte del terraplén (punto 5) es también significativamente ácida ( $\alpha = 33,1\%$ ). La elevada fracción de agua ácida de las aguas subterráneas de los piezómetros P24 y P25 pone de manifiesto la existencia de rellenos sulfurosos en su entorno.



**Fig. 10.** Fracción de agua ácida y valor medio del pH medido en los 7 puntos de seguimiento de la calidad del agua en aguas superficiales y en los 7 piezómetros situados en el terraplén del Aparral (ver Fig. 2), presentado sobre la línea de mezcla de un agua ácida con un pH 2,4 y un agua natural con un pH de 5,4.

La evolución temporal de la fracción de agua ácida en un determinado punto se puede calcular a partir de la evolución temporal del pH en dicho punto. La variación de la fracción de agua ácida en el tiempo es pequeña en las aguas no afectadas por problemas de acidez. Sin embargo, la variación es importante en los puntos con aguas ácidas.

La evolución del caudal de agua ácida en un punto se calcula como el producto de la fracción de agua ácida por el caudal total en cada tiempo. Los datos disponibles muestran que la fracción de agua ácida y el caudal de agua ácida aumentan de forma simultánea, confirmando por tanto la existencia de una correlación positiva entre ellos.

## 6.- Estimación de la carga de acidez

La carga de acidez en un determinado periodo de tiempo se obtiene integrando el producto del caudal de agua ácida y la concentración del agua ácida a lo largo de dicho periodo.

Dado que la serie de datos de caudales fiables en el aforador situado aguas arriba del terraplén (aforador 1) es más larga que la del aforador situado aguas abajo del terraplén (aforador 2), se han estimado los caudales en el aforador 2 a partir de los caudales medidos en los años 2019 y 2020 en el aforador 1, suponiendo que el caudal del aforador 2 es 2,36 veces menor que el del aforador 1. El caudal medio en el aforador 2 es igual a 7,2 L/s. Este caudal puede anularse en épocas de estiaje y puede llegar hasta 84,2 L/s en días muy lluviosos. El caudal de aguas ácidas en el aforador 2 es una fracción del caudal de dicha sección de aforo.

Se ha estimado la carga de acidez media que aportan

las aguas ácidas generadas por los rellenos del terraplén al arroyo del Aparral. Los cálculos realizados indican que, para las condiciones hidrológicas medias, la cantidad diaria de cal necesaria para neutralizar las aguas ácidas generadas por el terraplén del Aparral varía entre 8,28 kg de cal para un pH del agua ácida de 2,8 y 20,8 kg de cal para un pH del agua ácida de 2,4. Hay que tener en cuenta que la carga de acidez del terraplén es variable en el tiempo ya que el caudal de aguas ácidas es también variable en el tiempo.

## 7.- Conclusiones

Se han presentado los trabajos realizados para: (1) Definir la red de drenaje actual en el entorno del terraplén del Aparral; (2) Identificar las fuentes de acidez y los flujos de aguas ácidas superficiales y subterráneas y (3) Formular un modelo conceptual para la generación de las aguas ácidas y un modelo de mezcla de aguas en la zona de estudio. Se confirma la existencia de un flujo subterráneo hacia el terraplén desde el terreno natural aguas arriba y que la infiltración en el terraplén, desde la superficie de la autovía o desde los taludes, es poco significativa. El análisis de los datos hidroquímicos y de pH medidos in situ ha permitido: 1) Identificar los dos principales tipos de aguas superficial y subterránea (las aguas naturales y las aguas de drenaje de rocas ácidas o agua ácidas); 2) Definir las características químicas y la composición química de las aguas naturales y de las aguas ácidas y 3) Identificar de forma preliminar las partes del terraplén que contienen aguas ácidas. Las principales zonas del terraplén y sus alrededores en las que se han detectado aguas ácidas incluyen: 1) Una zona de rellenos situada aguas arriba del terraplén en la margen izquierda del arroyo del Aparral; 2) Los pies y las cunetas de los taludes norte y sur del terraplén; 3) La base del terraplén que aporta aguas ácidas que se recogen en las ODT. Además, pueden existir otras zonas de aporte de aguas ácidas de menor entidad asociadas a los rellenos exteriores situados en los alrededores del terraplén.

Se ha formulado un modelo conceptual para la generación de las aguas ácidas y un modelo de mezcla de aguas en el terraplén. El modelo se ha utilizado para definir las fracciones de mezcla de agua ácida de los diferentes flujos y estimar la carga de acidez media que aportan las aguas ácidas al arroyo del Aparral.

*Agradecimientos.* Este trabajo se ha realizado en el marco de un Contrato de investigación suscrito entre INTACTA y la Fundación de la Universidad de A Coruña. Los trabajos de INTACTA han sido financiados por la Agencia Gallega de Infraestructuras. Se ha contado además con fondos de la Universidad de A Coruña y del proyecto PID2019-109544RB-I00 del Programa Estatal de Generación del Conocimiento y Fortalecimiento Científico y Tecnológico del Sistema de I+D+i y de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad y del Proyecto de la Xunta de Galicia del Programa de “Consolidación y Estructuración de Unidades de Investigación Competitivas (Ref. ED431C2021/54).



## 8.- Bibliografía

- Clemmens, A., Bos, M.G., Replogle, J. 1984. Portable RBC Flumes for Furrows and Earthen Channels. Trans. ASAE 27, 1016-1021.
- Dafonte J, H Dopico, J Samper, L Montenegro, B Pisani, A Mon y A Naves, 2019, Drenaje ácido de aguas lixiviadas desde el terraplén de Apparral de la Autovía AG-64: estudio hidrológico y de la contaminación del río Chamoselo (As Pontes-A Coruña). En: Estudios de la Zona no Saturada Vol XIV, J Gabriel Pérez, D Martín-Lammerding y M Quemada Sáenz-Badillos, Ed. Madrid, 28-30 octubre, 154-160.
- Hammarstrom, J., Brady, K., Cravotta, C. 2005. *Acid-rock drainage at Skytop, Centre County, Pennsylvania, 2004*. USGS Open-File Report 2005-1148.
- Nordstrom D.K., 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.
- Orndorff, Z y Daniels, W. 2004. Evaluation of acid-producing sulfidic materials in Virginia highway corridors. *Environ. Geol.* 46, 209-216.
- NSW (Roads and Traffic Authority). 2005. *Guidelines for the Management of Acid Sulfate Materials: Acid Sulfate Soils, Acid Sulfate Rock and Monosulfidic Black Ooze*. Environment Branch. Road and Traffic Authority. New South Wales. Australia.