

Universidad de Huelva

Departamento de Física Aplicada



Incidencia de procesos AMD en la hidroquímica de embalses afectados en la Faja Pirítica Ibérica

Memoria para optar al grado de doctora
presentada por:

María Santisteban Fernández

Fecha de lectura: 9 de marzo de 2015

Bajo la dirección de los doctores:

José Antonio Grande Gil

María Luisa de la Torre Sánchez

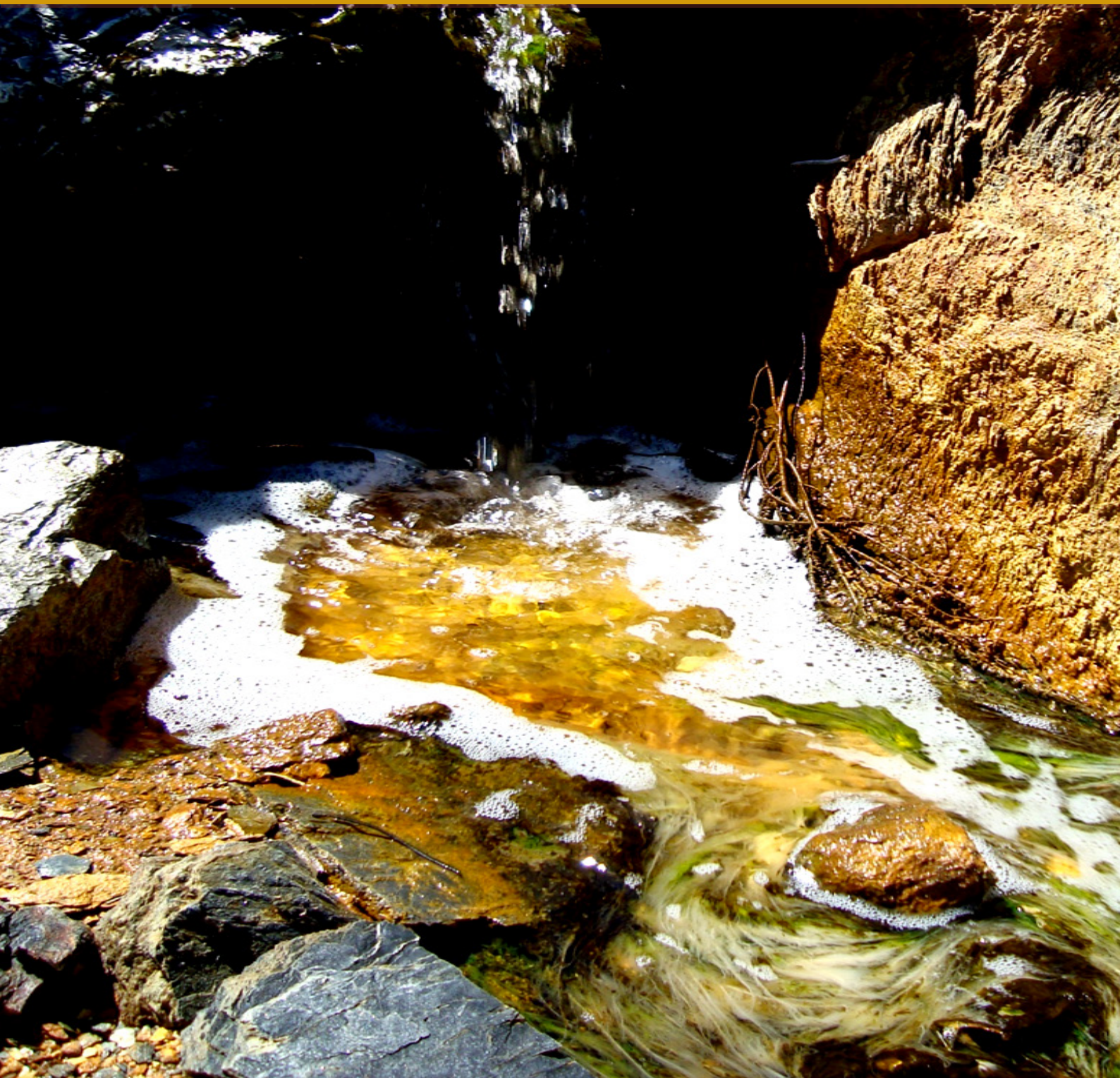
Teresa Maria Fernandes Valente

Huelva, 2015



INCIDENCE OF AMD PROCESSES IN THE HYDROCHEMISTRY OF AFFECTED RESERVOIRS IN THE IBERIAN PYRITE BELT

INCIDENCIA DE PROCESOS AMD EN LA HIDROQUIMICA DE EMBALSES AFECTADOS EN LA FAJA
PIRITICA IBERICA



María Santisteban Fernández

Tesis Doctoral 2015

Tecnología Ambiental. Departamento de Física Aplicada



INCIDENCIA DE PROCESOS AMD EN LA HIDROQUIMICA DE EMBALSES AFECTADOS EN LA FAJA PIRITICA IBERICA

María Santisteban Fernández

Tesis Doctoral

Tecnología Ambiental

Departamento de Física Aplicada

Universidad de Huelva

Directores:

Dr. José Antonio Grande Gil

Dra. María Luisa de la Torre Sánchez

Dra. Teresa María Fernandes Valente

Huelva, 5 de Febrero de 2015

D. José Antonio Grande Gil, Catedrático de Universidad del Área de Prospección e Investigación Minera de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva, Dña. María Luisa de la Torre Sánchez, Profesora Titular de Universidad de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva y Dña. Teresa María Fernandes Valente, Profesora Auxiliar de la Universidad do Minho (Portugal).

CERTIFICAN

Que Dña. MARIA SANTISTEBAN FERNANDEZ, Licenciada en Geología, Ingeniero Técnico de Minas y Máster en Tecnología Ambiental por la Universidad de Huelva, ha desarrollado bajo su dirección y dentro del programa de doctorado de Tecnología Ambiental, el trabajo de investigación correspondiente a su tesis doctoral titulado:

INCIDENCIA DE PROCESOS AMD EN LA HIDROQUIMICA DE EMBALSES AFECTADOS EN LA FAJA PIRITICA IBERICA

Revisado el presente trabajo, estiman que puede ser presentado al tribunal que ha de juzgarlo.

Y para que conste a efectos de lo establecido en el artículo octavo del Real Decreto 778/1998 y por la Normativa Reguladora del título de Doctor de la Universidad de Huelva, autorizan la presentación a trámite de este trabajo.

Huelva, 5 de Febrero de 2015.

Dr. José Antonio Grande Gil
(Director)

Dra. María Luisa de la Torre Sánchez
(Directora)

Dra. Teresa María Fernandes Valente
(Directora)

Doctoranda: María Santisteban Fernández

A Rodolfo, por creer en mí y por su apoyo incondicional.

A mi familia, por hacer de mí quien soy.

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que han contribuido de un modo u otro al desarrollo de la presente Tesis Doctoral.

En primer lugar y muy especialmente a los doctores José Antonio Grande Gil, María Luisa de la Torre Sánchez y Teresa Fernandes Valente, directores de esta Tesis, ya que sin ellos no hubiera sido posible su elaboración. Gracias por creer en mí desde un primer momento, por orientarme y guiarme, por vuestra disposición y dedicación necesaria para llevar a cabo todo el trabajo desarrollado. Gracias por todo vuestro apoyo, no sólo en el plano profesional, sino también en el personal.

Agradecer también a los miembros del Departamento de Ingeniería Minera, Mecánica y Energética de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, al Centro de Investigación para la Ingeniería en Minería Sostenible de esta Universidad, y al Centro de Investigaçao Geológica, Ordenamento y Valorizaçao de Recursos de la Universidad de Minho, por su acogida y por el trato recibido por cada uno de sus miembros.

Gracias a Dña. María Jesús Vílchez, coordinadora técnica del Laboratorio de Investigación y Control Agroalimentario de Huelva (LICAH), por solventar todas mis dudas, por su ayuda y por su apoyo en las tareas de laboratorio.

Al Dr. Javier Aroba Páez, por su ayuda con la “fuzzy logic” en la etapa de tratamiento de datos.

A mi grandes compañeras Eva Pérez Ostalé y María Cruzado Fernández, por haber estado a mi lado cada día de trabajo, desde el primer momento, prestando su ayuda tanto en las tareas de campo, como de laboratorio y gabinete.

Gracias también al resto de compañeros, que a lo largo de estos años han ido cooperando con las diversas tareas desarrolladas: a María José González Rivera, Guillermo Grande Gil, Alberto Durán Díaz, Noelia González Ponce, Ana Lobo Prieto y a Irene Salmerón García. Gracias por vuestra ayuda y compañía.

Quisiera también agradecer el más importante de los apoyos, el de mi familia. A mis padres, a los que se los debo todo, y a mis hermanos por creer siempre en mí.

Y, por último, de manera muy especial, dar las gracias a Rodolfo, por su comprensión y paciencia, por su ayuda y su apoyo incondicional, por sacar todo lo mejor de mí. Gracias por estar a mi lado cada día.

PROYECTO Y FINANCIACION

Esta Tesis Doctoral, desarrollada en el seno del Centro de Investigación para el Desarrollo de la Ingeniería en Minería Sostenible de la Universidad de Huelva, y en el Centro de Investigação Geológica, Ordenamento e Valorização de Recursos de la Universidad de Minho (Portugal), ha podido ser financiada al amparo de los siguientes Proyectos de Investigación de Concurrencia Competitiva:

1. Título del proyecto: CUANTIFICACION DE LA CARGA METALICA Y SULFATOS APORTADA POR PROCESOS AMD A EMBALSES DE LA FAJA PIRITICA IBERICA: MODELIZACION DEL PROCESO Y VELOCIDADES DE COLMATACION.

Entidad financiadora: Ministerio de Educación y Ciencia. Convocatoria CICYT.

Clave: (CGL2010-21268-C02-01).

Investigador responsable: Dr. D. José Antonio Grande Gil

2. Título del proyecto: CUANTIFICACION DE LA CARGA METALICA Y SULFATOS APORTADA POR PROCESOS AMD A EMBALSES DE LA FAJA PIRITICA IBERICA

Entidad financiadora: Junta de Andalucía. Convocatoria Proyectos de Excelencia.

Clave: (P10-RNM-6570)

Investigador responsable: Dr. D. José Antonio Grande Gil

RESUMEN

Resumen

En Europa, los principales problemas de contaminación por metales pesados en las aguas de ríos y embalses están asociados al drenaje ácido de mina, que tiene lugar en la Faja Pirítica Ibérica (FPI), situada en el SO Europeo, a lo largo de las provincias de Huelva y Sevilla, así como en el Sur de Portugal. La intensa actividad minera en esta zona metalogenética, ha dejado, en las cuencas de los ríos afectados un legado de 86 minas abandonadas, con sus pozos, socavones y cortas, sus innumerables kilómetros de túneles y sus 200 millones de m³ de residuos dispersos en centenares de escombreras y balsas mineras, constituyendo todos ellos, focos contaminantes que afectan a las aguas y sedimentos de ríos y embalses.

El problema adquiere una especial importancia, cuando estas aguas contaminadas por drenaje ácido de mina (AMD en la literatura anglosajona) llegan a los embalses, reduciendo sus usos. La Sociedad Española de Presas y Embalses (SEPREM) reconoce oficialmente la existencia de unas 30 presas y embalses en la Faja Pirítica Ibérica, de titularidad pública y privada, de uso agrícola, industrial o urbano. Muchos de estos embalses se ubican en cauces afectados por procesos de drenaje ácido de mina, lo que supone su contaminación por aguas con bajo pH y elevada carga metálica y de sulfatos.

El objetivo central de esta Tesis Doctoral se concreta en caracterizar las cargas contaminantes transportadas a los embalses presentes en la red fluvial de la FPI, que se encuentran afectados por procesos AMD, así como la modelización del proceso. Este estudio permite obtener una visión real del estado hidroquímico de los embalses, con especial atención en los contaminantes menos deseables.

Para la consecución de este objetivo central, durante un año hidrológico, se han llevado a cabo muestreos de agua en todos los embalses afectados por drenaje ácido de mina situados en la Faja Pirítica Ibérica, así como una campaña puntual de toma de sedimentos en uno de estos embalses, que en la actualidad se encuentra colmatado por precipitados AMD. Durante el siguiente hidrológico, se ha realizado, en varios puntos de uno de los embalse más representativos muestreados durante la primera campaña, un muestreo de agua, y han sido instaladas dos sondas multiparamétricas en dos de estos puntos de toma de agua para su monitorización. También ha sido muestreado para su caracterización un medio generador tipo.

Tras la aplicación de diversos tratamientos gráficos estadísticos, así como técnicas de fuzzy logic y data mining a los datos resultantes de todas las analíticas llevadas a

cabo, se ha llegado a concluir la afección por AMD de todos los embalses estudiados, presentando cada uno de ellos un rango de afección distinto. Así mismo, se advierte en los diferentes embalses, un elevado contraste entre valores extremos de pH y concentración de metales y sulfatos. Este diferente patrón individual de comportamiento es consecuencia de la coexistencia de paragénesis minerales muy diferentes a lo largo de la Faja Pirítica Ibérica, así como de la diversidad de tamaños y naturaleza de las cuencas vertientes y otros factores como la superficie afectada, tipo, intensidad y duración del proceso de tratamiento.

Mediante un estudio más pormenorizado del embalse El Sancho, se puede concluir que la mayor parte de los parámetros determinados en las aguas recogidas en los diferentes puntos de muestreo, se encuentran estrechamente relacionados entre sí, presentando, de un punto a otro, altos valores de correlación. Se ha observado una atenuación de la carga contaminante en el tránsito de éstos, como consecuencia de un simple mecanismo de disolución de las aguas de entrada ante el gran volumen de la cuenca receptora, que da lugar a la precipitación de oxihidroxisulfatos de hierro producida por la elevación del pH, así como de los subsiguientes fenómenos de sorción y dilución.

Estudiando, para este mismo embalse, la evolución de los parámetros típicos de la contaminación por AMD en la vertical, mediante un muestreo puntual, se concluye la estratificación de sus aguas en diferentes intervalos de profundidad que condicionan la ocurrencia de procesos de oxidación-reducción y precipitación.

Se ha llevado a cabo un muestreo de sedimentos en otro de los embalses afectados, el embalse Marismillas, que se encuentra colmatado por precipitados AMD. La distribución vertical de los elementos a lo largo de los perfiles de los sondeos, así como las diferencias de proximidad estadísticas entre ellos, reflejan las fluctuaciones de la antigua actividad minera su cuenca.

La elaboración de un mapa de riesgos ha permitido la visualización, para toda una provincia metalogénica, del grado potencial de contaminación por AMD sobre los embalses situados en su red fluvial.

La producción científica derivada del presente estudio se concreta en: Cerón *et al.*, 2013a-b; de la Torre *et al.*, 2014a-b-c; Grande *et al.*, 2012-2013b-2014a-b; Santisteban *et al.*, 2012-2013-2014a-b-c; Valente *et al.*, 2012b-2014.

ABSTRACT

In Europe, one of the main problems of metals pollution in rivers and reservoirs is promoted by acid mine drainage (AMD), occurring in the Iberian Pyrite Belt (IPB) in the SW of Europe, throughout the provinces of Huelva, Seville, and in the south of Portugal. The intense mining activity in this metallogenic region left a legacy of 86 abandoned mines, with about 200 million m³ of wastes dispersed by innumerable tailings, mining dams and waste dumps, which constitute nowadays sources of pollution, affecting the waters and sediments of the receiving rivers. The problem becomes more important when these AMD polluted streams reach the water reservoirs, reducing their uses. The Spanish Society of Dams and Reservoirs (SEPREM), officially recognizes the existence of 30 dams and reservoirs in the Iberian Pyrite Belt, of public and private ownership, and used for agricultural, industrial or urban supply. Many of these reservoirs are located in channels affected by acid mine drainage, which arrives at the reservoirs with low pH and high metal and sulfate loads.

The main objective of this thesis is to characterize the pollutant loads transported to the reservoirs by acid mine drainage and to model the global process. This study gives a real vision of the hydrochemical state of the reservoirs, with special attention to the less desirable contaminants.

In order to achieve this central objective, several water sampling campaigns were performed at different temporal and spatial scales. A sampling campaign in all AMD affected reservoirs was carried out during a hydrological year. Additionally, other campaigns were performed in a second hydrological year, covering several points established in a particular and representative reservoir. Also, a specific sampling was performed in an affected stream in order to achieve complete characterization of a representative AMD generating source. Finally, a sampling campaign devoted to sediment geochemistry was also conducted in a clogged mining reservoir.

The application of several statistical graphic treatments as well as fuzzy logic and data mining techniques highlighted that all the reservoirs suffer from AMD influence, each one of them showing a different range of contamination, not being clear any overall pattern of behavior. Also, it is noted a high contrast between extreme values of pH and concentration of metals and sulfates for the different reservoirs. This individual pattern may be the result of the coexistence of very different mineral paragenesis throughout the IPB, as well as the diversity of size and nature of the watersheds. Other factors,

such as the affected area, type, intensity and duration of the mining processes also contribute to the development of individual hydrochemical patterns.

Detailed studies, with samples from two different points of a representative reservoir, in Sancho reservoir, indicated that most parameters are closely related, and presenting high correlation coefficients between the two points.

This study revealed the existence of attenuation processes as the contaminants enter the reservoir and move along it. So, dilution promoted by the contact with a large volume of water as well as iron hydroxysulfates precipitating as a consequence of the rise in the pH are among the main attenuation phenomena. This is incremented by the subsequent sorption processes that occur on the surfaces of these solid phases.

At the same representative reservoir, a study of vertical distribution of the typical AMD parameters indicated a stratification of the water column at different depth intervals that determine the occurrence of oxidation-reduction processes and precipitation.

Another representative reservoir, Marismillas reservoir, which is clogged by AMD precipitates, was studied for sediments geochemistry. The spatial distribution of elements along three vertical profiles reflects the fluctuations throughout former mining activity on the Tinto river basin.

Finally, the development of a risk map for the entire Iberian Pyrite Belt has allowed the visualization of the whole metallogenic province concerning the contamination degree by AMD of the reservoirs located in its network.

The scientific production resulting from this study is consisted of: Cerón *et al.*, 2013a-b; de la Torre *et al.*, 2014a-b-c; Grande *et al.*, 2012-2013b-2014a-b; Santisteban *et al.*, 2012-2013-2014a-b-c; Valente *et al.*, 2012b-2014.

INDICE

INDICE GENERAL

| | |
|---|------------|
| 1. INTRODUCCION | 47 |
| 1.1. EL DRENAJE ACIDO DE MINA | 47 |
| 1.2. PROCESOS DE OXIDACION DE SULFUROS | 51 |
| 1.3. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL ARTE | 56 |
| 1.4. LA FAJA PIRÍTICA IBÉRICA: 4000 AÑOS DE MINERÍA | 58 |
| 1.5. LOCALIZACION DE LA ZONA DE ESTUDIO | 62 |
| 1.5.1. <i>Localización geográfica</i> | 62 |
| 1.5.2. <i>Localización geológica</i> | 67 |
| 1.5.3. <i>Marco hidrológico</i> | 71 |
| 1.5.3.1. Embalses afectados por el drenaje ácido de mina en la Faja Pirítica Ibérica. | 71 |
| 1.5.3.1.1. Cuenca del Odiel | 73 |
| 1.5.3.1.2. Cuenca del Tinto | 82 |
| 1.5.3.1.3. Cuenca del Guadiana | 86 |
| 1.5.3.1.4. Cuenca del Guadiamar | 89 |
| 2. OBJETIVOS | 97 |
| 2.1. OBJETIVO CENTRAL DE LA TESIS DOCTORAL | 97 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS | 97 |
| 3. ESTUDIO CLIMATICO | 103 |
| 3.1. EL CLIMA COMO CONDICIONANTE DE LOS PROCESOS AMD | 103 |
| 3.2. MASA DE DATOS | 103 |
| 3.3. CLASIFICACION CLIMATICA | 121 |
| 3.3.1. <i>Índices climáticos</i> | 122 |
| 3.3.1.1. Índices de aridez | 122 |
| 3.3.1.1.1. Índice de Lang | 122 |
| 3.3.1.1.2. Índice termopluviométrico de Dantin-Revenga | 123 |
| 3.3.1.2. Índice de Vernet | 123 |
| 3.3.2. <i>Climodiagrama de Walter y Liet</i> | 124 |

| | |
|--|------------|
| 3.3.3. <i>Clasificación climática de Thornthwaite</i> | 126 |
| 3.3.3.1. Balance hídrico | 126 |
| 3.3.3.2. Índice de humedad | 131 |
| 3.3.3.3. Índice de eficacia térmica | 133 |
| 4. MATERIALES Y METODOS | 139 |
| <hr/> | |
| 4.1. DISEÑO DE LA RED Y PLAN DE MUESTREO | 139 |
| 4.1.1. <i>Primera campaña de muestreo</i> | 140 |
| 4.1.1.1. Muestreo bimensual de agua en embalses | 140 |
| 4.1.1.2. Muestreo puntual de agua en profundidad en el embalse El Sancho | 145 |
| 4.1.1.3. Muestreo de sedimentos en el embalse Marismillas | 145 |
| 4.1.1.4. Muestreo puntual de agua en mina Poderosa | 146 |
| 4.1.2. <i>Segunda campaña de muestreo</i> | 148 |
| 4.1.2.1. Muestreo semanal de agua en el embalse Sancho | 148 |
| 4.1.2.2. Toma de datos físico-químicos mediante sondas multiparamétricas instaladas el embalse El Sancho | 149 |
| 4.2. TRATAMIENTO Y ANALISIS | 149 |
| 4.2.1. <i>Muestras de agua</i> | 149 |
| 4.2.1.1. Selección de parámetros | 149 |
| 4.2.1.2. Medidas <i>in situ</i> | 150 |
| 4.2.1.3. Muestreo en campo | 151 |
| 4.2.1.4. Tratamiento de las muestras | 152 |
| 4.2.1.5. Métodos analíticos | 153 |
| 4.2.2. <i>Muestras de sedimento</i> | 155 |
| 4.2.2.1. Selección de parámetros. | 155 |
| 4.2.2.2. Muestreo en campo | 155 |
| 4.2.2.3. Tratamiento de las muestras | 156 |
| 4.2.2.4. Métodos analíticos | 157 |
| 5. RESULTADOS, DISCUSION Y CONCLUSIONES PARCIALES OBTENIDAS MEDIANTE TRATAMIENTO GRÁFICO-ESTADISTICO Y LOGICA BORROSA | 163 |
| <hr/> | |
| 5.1. INTRODUCCIÓN | 163 |
| 5.1.1. <i>Estudio del sumario estadístico</i> | 164 |
| 5.1.2. <i>Análisis Multivariable</i> | 164 |
| 5.1.2.1. Análisis factorial | 164 |
| 5.1.2.2. Análisis Cluster | 165 |
| 5.1.2.3. Series Temporales | 166 |
| 5.1.2.4. Función de Correlación Cruzada (FCC) | 167 |
| 5.1.2.5. Función de Auto-Correlación (FAC) | 167 |

| | | |
|------------|---|-----|
| 5.1.3. | <i>Fuzzy Logic</i> | 168 |
| 5.1.3.1. | La herramienta informática: Predictive Fuzzy Rules Generator (PreFuRGe) | 170 |
| 5.2. | PRESENTACION DE LAS MASAS DE DATOS | 172 |
| 5.2.1. | <i>Primera campaña de muestreo</i> | 172 |
| 5.2.1.1. | Muestreo de agua bimensual en todos los embalses objeto de estudio durante todo el año hidrológico (Masa 1) | 172 |
| 5.2.1.2. | Muestreo de agua en profundidad llevado a cabo, de manera puntual, en la presa del embalse El Sancho (Masa 2) | 193 |
| 5.2.1.3. | Muestreo de sedimentos llevado a cabo, de manera puntual, durante el periodo seco en el embalse de Marismillas (Masa 3) | 194 |
| 5.2.1.4. | Muestreo de agua llevado a cabo de manera puntual en mina Poderosa (Masa 4) | 194 |
| 5.2.2. | <i>Segunda campaña de muestreo</i> | 195 |
| 5.2.2.1. | Muestreo de agua semanal en el embalse El Sancho durante todo el año hidrológico (Masa 5) | 195 |
| 5.2.2.2. | Determinación de parámetros físico-químicos obtenidos de las sondas multiparamétricas instaladas en la cola y en la presa del embalse El Sancho durante el todo el año hidrológico (Masa 6) | 199 |
| 5.3. | ANALISIS GRAFICO-ESTADISTICO | 199 |
| 5.3.1. | <i>Primera campaña de muestreo.</i> | 199 |
| 5.3.1.1. | Muestreo de agua bimensual en todos los embalses objeto de estudio durante todo el año hidrológico (Masa 1) | 199 |
| 5.3.1.1.1. | Conclusiones derivadas del estudio de las muestras obtenidas en el muestreo de agua bimensual en todos los embalses objeto de estudio | 215 |
| 5.3.1.2. | Muestreo de agua bimensual en el embalse El Sancho durante todo el año hidrológico (Masa 1) | 216 |
| 5.3.1.2.1. | Conclusiones derivadas del estudio de las muestras tomadas en el muestreo de agua bimensual en el embalse El Sancho | 223 |
| 5.3.1.3. | Muestreo de agua en profundidad llevado a cabo, de manera puntual, en la presa del embalse El Sancho (Masa 2) | 224 |
| 5.3.1.3.1. | Conclusiones derivadas del estudio de las muestras tomadas en el muestreo de agua en profundidad, llevado a cabo de manera puntual, en la presa del embalse El Sancho | 234 |
| 5.3.1.4. | Muestreo de sedimentos llevado a cabo, de manera puntual, durante el periodo seco en el embalse de Marismillas (Masa 3) | 235 |
| 5.3.1.4.1. | Conclusiones derivadas del estudio de las muestras tomadas en el muestreo de sedimentos llevado a cabo, de manera puntual, durante el periodo seco en el embalse de Marismillas | 246 |

| | | |
|------------|--|-----|
| 5.3.1.5. | Muestreo de agua llevado a cabo de manera puntual en mina Poderosa (Masa 4) | 247 |
| 5.3.1.5.1. | Conclusiones derivadas del estudio de las muestras tomadas en el muestreo de agua llevado a cabo de manera puntual en mina Poderosa | 255 |
| 5.3.2. | <i>Segunda campaña de muestreo</i> | 255 |
| 5.3.2.1. | Muestreo de agua semanal en el embalse El Sancho durante todo el año hidrológico (Masa 5) | 255 |
| 5.3.2.1.1. | Conclusiones derivadas del estudio de las muestras de agua tomadas en el muestreo de agua semanal en el embalse El Sancho durante todo el año hidrológico | 260 |
| 5.3.2.2. | Parámetros físico-químicos obtenidos de las sondas multiparamétricas instaladas en la cola y en la presa del embalse El Sancho durante el todo el año hidrológico (Masa 6) | 261 |
| 5.3.2.2.1. | Conclusiones derivadas del estudio de los parámetros físico-químicos obtenidos de las sondas multiparamétricas instaladas en el embalse El Sancho durante todo el año hidrológico | 266 |
| 5.4. | APLICACIÓN DE TECNICAS DE FUZZY LOGIC | 267 |
| 5.4.1. | Muestreo de agua llevado a cabo de manera puntual en mina Poderosa durante el primer año hidrológico (Masa 4) | 267 |
| 5.4.1.1. | Conclusiones derivadas del muestreo de las muestras de agua tomadas en el muestreo de agua llevado a cabo de manera puntual en mina Poderosa durante el primer año hidrológico. | 271 |
| 5.4.2. | Parámetros físico-químicos obtenidos de las sondas multiparamétricas instaladas en el punto cola y punto presa en el embalse El Sancho durante todo el segundo año hidrológico (Masa 6) | 271 |
| 5.4.2.1. | Conclusiones derivadas de los parámetros físico-químicos obtenidos de las sondas multiparamétricas instaladas en el punto cola y punto presa en el embalse El Sancho durante todo el segundo año hidrológico | 278 |
| 6. | CONCLUSIONES FINALES | 283 |
| <hr/> | | |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 299 |
| <hr/> | | |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 1.1. Esquema simplificado de la química del drenaje ácido de mina (Guevara, 2012) | 53 |
| Figura 1.2. Ritmo de oxidación de la pirita (Singer y Stumm, 1970) | 54 |
| Figura 1.3. Rapidez de oxidación y su dependencia con la relación Fe^{3+}/Fe^{2+} (Espinosa <i>et al.</i> , 2010) | 55 |
| Figura 1.4. Mapa de localización de la Faja Pirítica Ibérica. | 65 |
| Figura 1.5. Principales unidades geológicas de la Península Ibérica y Baleares (modificado de Vera, 2004). | 67 |
| Figura 1.6. Mapa general de la Zona Surportuguesa (Vera, 2004). | 68 |
| Figura 1.7. Columna Estratigráfica General de la FPI (Schermerhörn, 1971). | 70 |
| Figura 1.8. Mapa de la red fluvial de la cuenca del río Odiel con la ubicación de los principales embalses y minas, así como de sus subcuencas | 74 |
| Figura 1.9. Mapa de la red fluvial de la cuenca del río Tinto con la ubicación de los principales embalses y minas | 83 |
| Figura 1.10. Mapa de la red fluvial de la cuenca del río Guadiana con la ubicación de los principales embalses y minas | 86 |
| Figura 1.11. Mapa de la red fluvial de la cuenca del río Guadiamar con la ubicación de los principales embalses y minas | 91 |
| Figura 3.1. Climodiagrama de Walter y Lieth | 125 |
| Figura 3.2. Diagrama de balance hídrico para una capacidad de campo de 100 mm | 130 |
| Figura 3.3. Diagrama de balance hídrico para una capacidad de campo de 150 mm | 131 |
| Figura 4.1. Red de muestreo | 141 |
| Figura 4.2. Localización de los puntos de muestreo | 144 |
| Figura 4.3. Mapa de localización de mina Poderosa | 147 |
| Figura 4.4. Localización de los puntos muestreados en mina Poderosa | 148 |
| Figura 4.5. Esquema representativo de las sondas instaladas en la cola y en la presa del embalse de El Sancho | 149 |
| Figura 4.6. Representación de las anomalías magnéticas y sondeos realizados en el embalse Marismillas | 155 |
| Figura 5.1. Universo de discurso X de la variable x, "pH muy bajo" para unas muestras determinadas | 169 |
| Figura 5.2. Ejemplo de algoritmo para obtener trapecios de las reglas gráficas | 171 |
| Figura 5.3. Dendrogramas de variables de los embalses objeto de estudio (Santisteban <i>et al.</i> , 2013) | 206 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.4. Dendrograma de variables del Grupo 1 (Cerón <i>et al.</i> , 2013b) | 207 |
| Figura 5.5. Dendrograma de variables del Grupo 2 (Cerón <i>et al.</i> , 2013b) | 207 |
| Figura 5.6. Dendrograma de variables del Grupo 3 (Cerón <i>et al.</i> , 2013b) | 208 |
| Figura 5.7. Porcentaje de embalses que superan la Directiva 75/440/CEE para los diferentes contaminantes en estudio (Grande <i>et al.</i> , 2013b) | 210 |
| Figura 5.8. Representación del grado de afección de los embalses (Grande <i>et al.</i> , 2013b) | 212 |
| Figura 5.9. Mapa de afección basado en la Directiva 75/440/CEE para los diferentes embalses muestreados (Grande <i>et al.</i> , 2013b) | 213 |
| Figura 5.10. Funciones de correlación cruzada entre pares de variables analizados en los puntos cola y cauce del embalse El Sancho (Lag: 15 días) (de la Torre <i>et al.</i> , 2014a) | 217 |
| Figura 5.11. Series temporales de los parámetros analizados en los puntos cola y cauce del embalse El Sancho (de la Torre <i>et al.</i> , 2014a) | 223 |
| Figura 5.12. Análisis factorial de variables (Cerón <i>et al.</i> , 2013a) | 226 |
| Figura 5.13. Análisis factorial de observaciones (Cerón <i>et al.</i> , 2013a) | 226 |
| Figura 5.14. Gráficos de evolución en profundidad del agua muestreada en la presa del embalse El Sancho, con expresión numérica de la función de ajuste (Grande <i>et al.</i> , 2014a) | 229 |
| Figura 5.15. Cluster de variables (Grande <i>et al.</i> , 2014a) | 233 |
| Figura 5.16. Cluster de observaciones (Grande <i>et al.</i> , 2014a) | 234 |
| Figura 5.17. Perfiles verticales de concentración de Fe, Al, As, Zn, S, Pb, Cu y Cd en los sondeos (Valente <i>et al.</i> , 2014) | 239 |
| Figura 5.18. Media de los factores de enriquecimiento de los elementos estudiados en los sondeos de Marismillas (Valente <i>et al.</i> , 2014) | 241 |
| Figura 5.19. Perfiles verticales de los factores de enriquecimiento (FE) para los metales estudiados en los sondeos de Marismillas (Valente <i>et al.</i> , 2014) | 243 |
| Figura 5.20. Análisis cluster obtenido para todos los elementos estudiados en los sondeos realizados en los sedimentos del embalse Marismillas (Valente <i>et al.</i> , 2014) | 244 |
| Figura 5.21. Dendrograma de variables para los puntos de muestreo en mina Poderosa (Grande <i>et al.</i> , 2014b) | 247 |
| Figura 5.22. Dendrograma de variables para los parámetros físico-químicos muestreados en mina Poderosa (Grande <i>et al.</i> , 2014b) | 248 |
| Figura 5.23. Gráfica de evolución espacial de los parámetros medidos <i>in situ</i> en los diferentes puntos de muestreo en mina Poderosa (Grande <i>et al.</i> , 2014b) | 250 |
| Figura 5.24. Gráfica de evolución espacial de los metales y sulfatos analizados para los diferentes puntos de muestreo en mina Poderosa (Grande <i>et al.</i> , 2014b). | 253 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.25. Representación del porcentaje de reducción de la concentración de los parámetros entre la cola y la presa del Embalse El Sancho (Santisteban <i>et al.</i> , 2014a) | 257 |
| Figura 5.26. Funciones de correlación cruzada de las variables analizadas entre los dos puntos de muestreo (cola y presa) en el Embalse El Sancho (Lag: 1 semana) (Santisteban <i>et al.</i> , 2014a) | 259 |
| Figura 5.27. Función de auto-correlación para el pH en el punto cola y en el punto presa del Embalse El Sancho (Lag: 30 minutos) | 264 |
| Figura 5.28. Función de autocorrelación para la conductividad en la cola y en la presa del Embalse El Sancho (Lag: 30 minutos) (de la Torre <i>et al.</i> , 2014b) | 264 |
| Figura 5.29. Función de correlación cruzada para el pH en la cola y en la presa del Embalse El Sancho (Lag: 30 minutos) (de la Torre <i>et al.</i> , 2014b) | 265 |
| Figura 5.30. Función de correlación cruzada para la conductividad en la cola y en la presa del Embalse El Sancho (Lag: 30 minutos) (de la Torre <i>et al.</i> , 2014b) | 265 |
| Figura 5.31. Reglas borrosas obtenidas para las variables analizadas en las muestras de agua tomadas en Mina Poderosa, tomando el Potencial Redox como consecuente (Grande <i>et al.</i> , 2014c) | 268 |
| Figura 5.32. Reglas borrosas obtenidas para las variables analizadas en las muestras de agua tomadas en Mina Poderosa, tomando el pH como consecuente (Grande <i>et al.</i> , 2014c) | 269 |
| Figura 5.33. Reglas borrosas obtenidas para la cola del Embalse Sancho tomando el pH como consecuente y el resto de variables como antecedentes (Santisteban <i>et al.</i> , 2014c) | 273 |
| Figura 5.34 Reglas borrosas obtenidas para la presa del Embalse Sancho tomando el pH como consecuente y el resto de variables como antecedentes (Santisteban <i>et al.</i> , 2014c) | 275 |
| Figura 5.35. Reglas borrosas obtenidas para la cola del Embalse Sancho tomando la lluvia como consecuente y el resto de variables como antecedentes (Santisteban <i>et al.</i> , 2014c) | 276 |
| Figura 5.36. Reglas borrosas obtenidas para la presa del Embalse Sancho tomando la lluvia como consecuente y el resto de variables como antecedentes (Santisteban <i>et al.</i> , 2014c) | 277 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1.1. Análisis medio de dos tipos de menas del cinturón pirítico (D.G.I.E.M., 1986) | 64 |
| Tabla 1.2. Principales características del embalse del Pino | 75 |
| Tabla 1.3. Principales características del embalse de El Sancho | 75 |
| Tabla 1.4. Principales características del embalse La Joya | 77 |
| Tabla 1.5. Principales características del embalse Garnacha | 78 |
| Tabla 1.6. Principales características del embalse Grande | 78 |
| Tabla 1.7. Principales características del embalse Olivargas | 79 |
| Tabla 1.8. Principales características del embalse Puerto León | 79 |
| Tabla 1.9. Principales características del embalse Campanario | 80 |
| Tabla 1.10. Principales características del embalse Gossan | 81 |
| Tabla 1.11. Principales características del embalse Marismillas | 84 |
| Tabla 1.12. Principales características del embalse Corumbel | 85 |
| Tabla 1.13. Principales características del embalses Silillos I y II | 85 |
| Tabla 1.14. Principales características de la presa del Andévalo | 88 |
| Tabla 1.15. Principales características del embalse Chanza | 88 |
| Tabla 1.16. Principales características del embalse Herrerías | 89 |
| Tabla 1.17. Principales características del embalse Lagunazo | 89 |
| Tabla 1.18. Principales características del embalse Agrio | 90 |
| Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI) | 105 |
| Tabla 3.2. Resumen de parámetros meteorológicos referidos a 32 años (1980-2011) | 121 |
| Tabla 3.3. Zonas climáticas correspondientes al Índice de Lang | 122 |
| Tabla 3.4. Zonas climáticas correspondientes al índice termopluviométrico de Dantin-Revenga | 123 |
| Tabla 3.5. Tipos de clima en función del Índice de Vernet | 124 |
| Tabla 3.6. Valores de ETP calculada por Thornthwaite | 126 |
| Tabla 3.7. Balance hídrico para una capacidad de campo de 100 mm | 128 |
| Tabla 3.8. Balance hídrico para una capacidad de campo de 150 mm | 129 |
| Tabla 3.9. Tipos climáticos e índices de humedad | 132 |
| Tabla 3.10. Tipos climáticos en base a la eficacia térmica | 134 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 4.1. Coordenadas de los puntos de muestreo de aguas y sedimentos en cada embalse | 143 |
| Tabla 5.1. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Agrio (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomas de la estación meteorológica El Campillo) | 173 |
| Tabla 5.2. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Agrio (n.m: No medido; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo) | 173 |
| Tabla 5.3. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Andévalo-Cobica (Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 174 |
| Tabla 5.4. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Andévalo-Cobica (n.m: No medido; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 174 |
| Tabla 5.5. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Andévalo-Chorrito (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 175 |
| Tabla 5.6 Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Andévalo-Chorrito (n.m: No medido; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 175 |
| Tabla 5.7. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Campanario (n.d: No detectado; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo) | 176 |
| Tabla 5.8. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Campanario (n.m: No medido; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo) | 176 |
| Tabla 5.9. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Chanza (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo) | 177 |
| Tabla 5.10. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Chanza (n.m: No medido; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo) | 177 |
| Tabla 5.11. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Corumbel (n.d: No detectado; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo) | 178 |
| Tabla.5.12. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Corumbel (n.m: No medido; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo) | 178 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 5.13. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse del Pino (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 179 |
| Tabla 5.14. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse del Pino (n.m: no medido; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 179 |
| Tabla 5.15. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Grande (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 180 |
| Tabla 5.16. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Grande (n.m: No medido; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 180 |
| Tabla 5.17. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Lagunazo (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 181 |
| Tabla 5.18. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Lagunazo (n.m: No medido; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 181 |
| Tabla 5.19. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse La Joya (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 182 |
| Tabla 5.20. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse La Joya (n.m: No medido; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 182 |
| Tabla 5.21. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Marismillas (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo) | 183 |
| Tabla 5.22. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Marismillas (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo) | 183 |
| Tabla 5.23. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse El Sancho (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo) | 184 |
| Tabla 5.24. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse El Sancho (Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo) | 184 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 5.25. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Silillos I (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo) | 185 |
| Tabla 5.26. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Silillos I (n.m: No medido; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo) | 185 |
| Tabla 5.27. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Silillos II. (Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo) | 186 |
| Tabla 5.28. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Silillos II (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo) | 186 |
| Tabla 5.29. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Olivargas (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 187 |
| Tabla 5.30. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Olivargas (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 187 |
| Tabla 5.31. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Cueva de la Mora (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 188 |
| Tabla 5.32. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Cueva de la Mora (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 188 |
| Tabla 5.33. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Puerto León (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 189 |
| Tabla 5.34. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Aguas Ácidas (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 189 |
| Tabla 5.35. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Herrerías (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 190 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 5.36. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Dique I (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 190 |
| Tabla 5.37. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Dique II (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 191 |
| Tabla.5.38. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Garnacha (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro) | 191 |
| Tabla 5.39. Parámetros físico-químicos medidos en el embalse Gossan (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo) | 192 |
| Tabla.5.40. Parámetros físico-químicos analizados en la presa del embalse El Sancho durante el muestreo en profundidad realizado en Octubre del primer año hidrológico (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L) | 193 |
| Tabla 5.41. Parámetros físico-químicos medidos en las muestras de aguas tomadas en Mina Poderosa | 194 |
| Tabla 5.42. Caracterización química de las muestras de aguas tomadas en Mina Poderosa (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L) | 195 |
| Tabla 5.43. Caracterización química de las muestras de agua tomadas en el punto cauce del embalse El Sancho (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; n.m: No medido) | 196 |
| Tabla 5.44. Caracterización química de las muestras de agua tomadas en el punto cola del embalse El Sancho (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L) | 197 |
| Tabla 5.45. Caracterización química de las muestras de agua tomadas en el punto presa del embalse El Sancho (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L) | 198 |
| Tabla 5.46. Sumario estadístico de los valores medios de los parámetros obtenidos en el punto cola de los diferentes embalses muestreados (Grande <i>et al.</i> , 2013) | 200 |
| Tabla 5.47. Agrupación de los embalses en función del valor de pH | 201 |
| Tabla 5.48. Sumario estadístico desglosado por grupos de pH | 203 |
| Tabla 5.49. Valores paramétricos máximos admisibles por la Directiva 75/440/CEE para la calidad del agua de abastecimiento público | 210 |
| Tabla 5.50. Sumario estadístico de las variables analizadas en las muestras obtenidas a diferentes profundidades en el embalse El Sancho (Grande <i>et al.</i> , 2014a) | 225 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 5.51. Sumario estadístico de los parámetros analizados en las muestras de sedimentos del embalse Marismillas Valente <i>et al.</i> ,(2014) | 237 |
| Tabla 5.52 Sumario estadístico de los factores de enriquecimiento de los elementos a partir de los sedimentos de los sondeos del embalse Marismillas (El Sc es el elemento de referencia. Se analizó en las muestras 16Bacuta y 17Bacuta obtenidos en los sedimentos fluviales, (Ruiz <i>et al.</i> , 1998) | 240 |
| Tabla 5.53. Sumario estadístico de los parámetros analizados en el punto cola del embalse El Sancho (Santisteban <i>et al.</i> , 2014a) | 256 |
| Tabla 5.54. Sumario estadístico de los parámetros analizados en el punto presa del embalse El Sancho (Santisteban <i>et al.</i> , 2014a) | 257 |
| Tabla 5.55. Sumario estadístico de los parámetros medidos por las dos sondas multiparamétricas instaladas en la cola y el muro de la presa del embalse El Sancho (Lluvia: Datos de precipitación acumulada obtenida de la estación meteorológica de Alosno) (de la Torre <i>et al.</i> , 2014b) | 262 |

INDICE DE FOTOGRAFIAS

| | |
|--|-----|
| Fotografía 1.1. Colonización de algas en el río Tinto | 48 |
| Fotografía 1.2. Imagen ilustrativa del yellow boy en el río Odiel | 49 |
| Fotografía 1.3. Paisajes mineros de Ríotinto en 1900 (AFRT) | 59 |
| Fotografía 1.4. Río Meca | 76 |
| Fotografía 1.5. Embalse Gossan | 83 |
| Fotografía 1.6. Embalse Marismillas, colmatado en la actualidad | 84 |
| Fotografía 4.1. Campaña de sondeos realizada en el embalse Marismillas en Noviembre de 2011 | 145 |
| Fotografía 4.2. Túnel localizado en mina Poderosa | 147 |
| Fotografía 4.3. Equipo multiparamétrico Crison MM40 | 151 |
| Fotografía 4.4. Imagen de una de las sondas multiparamétricas empleadas durante el proceso de volcado de datos al ordenador | 152 |
| Fotografía 4.5. Sistema de filtración con quitasatos de vidrio | 153 |
| Fotografía 4.6. Fotómetro para análisis de sulfatos | 154 |
| Fotografía 4.7. Absorción Atómica Perkin-Elmer AAS (AAAnalyst 800) | 154 |
| Fotografía 4.8. Testigo de uno de los sondeos realizados en el embalse Marismillas | 156 |

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1. INTRODUCCION

1.1. EL DRENAJE ACIDO DE MINA

El drenaje ácido es un proceso que tiene lugar cuando un mineral sulfuroso entra en contacto con el oxígeno y la humedad atmosférica, produciéndose la oxidación de los sulfuros, un aumento de la acidez de las aguas, así como de su contenido en elementos trazas y sulfatos hasta valores extremos (USEPA, 1994; Lyew and Sheppard, 2001; Grande *et al.*, 2005a).

Este proceso de oxidación puede tener su origen de forma natural en los yacimientos de sulfuros, cuando éstos afloran en superficie, denominándose en este caso drenaje ácido de roca o ARD (iniciales anglosajonas de Acid Rock Drainage). Los minerales se ven expuestos constantemente al oxígeno y al agua por procesos naturales, como la erosión y la actividad tectónica. Bajo condiciones naturales, el suelo que cubre la roca y el agua subterránea minimizan el contacto de los sulfuros con el oxígeno, y aunque el procesos de oxidación tiene lugar, la velocidad de reacción es tan baja, que, en ocasiones, el efecto sobre la calidad general del agua es insignificante o indetectable. Sin embargo, bajo condiciones antropogénicas tales como obras civiles, construcción de vías, y en especial, por la actividad minera, se acelera la velocidad de generación de drenaje ácido, ya que este material sulfuroso pasa a la superficie, quedando en contacto directo con el oxígeno y la humedad atmosférica. En este caso, el proceso es denominado como drenaje ácido de mina o AMD (iniciales en inglés de Acid Mine Drainage).

El hombre, mediante la actividad minera, incrementa el proceso contaminante esencialmente por medio de tres fenómenos (Sáinz *et al.*, 2000a):

1. Afloramiento de sulfuros, bien sea de minerales piríticos o de los millones de toneladas de rocas extraídas en las explotaciones mineras, tanto a cielo abierto como en minería subterránea, para acceder al mineral. Este material junto a minerales de baja ley, rechazos de las plantas de tratamiento y concentración, se depositan cerca de la explotación, siendo algunos de gran envergadura, conocidos como escombreras.
2. Aumento de la superficie específica de los minerales: por trituración del mineral arrancado, hasta alcanzar un diámetro entre 0 y 6 mm, y en algunos casos hasta reducirlos a granulometrías con un 80% de partículas

menores de 20 micras. De esta forma, la superficie de oxidación aumenta millones de veces, incrementándose su capacidad contaminante.

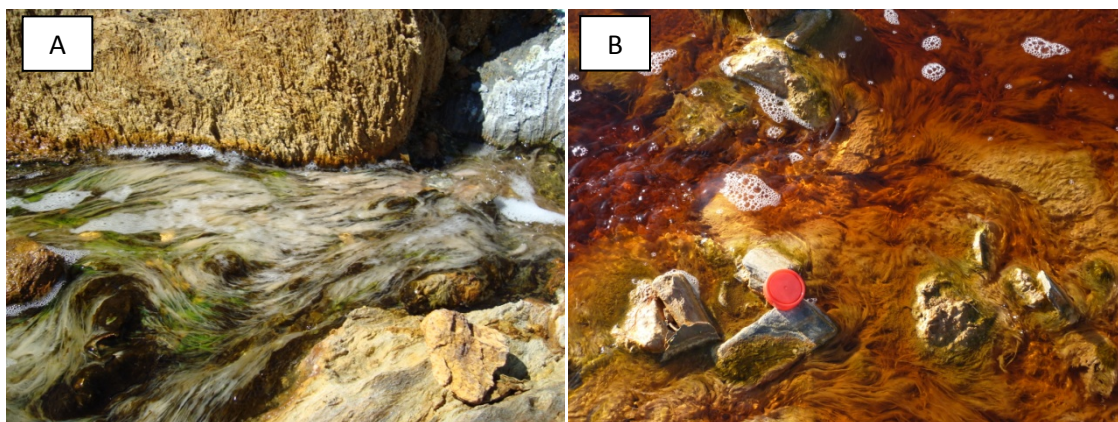
3. Aumento de factores oxidantes y extractivos: en el interior de las minas, en las grandes extensiones de las paredes creadas en zonas de alta mineralización, las rocas sulfurosas procedentes del relleno o de los hundimientos, constituyen ambientes de fuerte reactividad, que se ve favorecida por la circulación forzada de aire y agua, provocada por la ventilación y por el drenaje subterráneo.

La contaminación de las redes fluviales por drenaje ácido de mina constituye uno de los más graves tipos de contaminación hídrica, por su naturaleza, extensión y dificultad de resolución (Azcue, 1999), así como por los costes económicos de su remediación (Commonwealth of Pennsylvania, 1994).

Las zonas afectadas por AMD se identifican mediante indicadores ecológicos, físico-químicos, y mineralógicos.

Desde el punto de vista físico-químico, las aguas en las que ocurren procesos AMD, se caracterizan por su alto contenido en metales, alto contenido en sulfatos, altos valores de conductividad eléctrica y bajos valores de pH, que indican alto grado de acidez de las aguas (Sáinz *et al.*, 2002).

En lo que respecta a los indicadores ecológicos, la abundancia y distribución de algas (Fotografía 1.1), están relacionados con la intensidad de AMD (Valente y Leal Gomes, 2007). *Euglena mutabilis* y *Klebsormidium*, son especies que se ha comprobado que colonizan, principalmente, estos tipos de ambientes.



Fotografía 1.1. Colonización de algas en el río Tinto.

Desde el punto de vista mineralógico, se observa la formación de diferentes tipos de precipitados, que incluyen la precipitación de minerales secundarios fácilmente visibles en los cauces afectados. Por ejemplo, los depósitos de hidróxidos de hierro (III) son un claro impacto visual de la afección por AMD en los ríos. Su color varía desde el ocre amarillento al rojo intenso, y se denomina en la bibliografía anglosajona como *yellow boy* (Fotografía 1.2). Aunque están compuestos de hidróxidos de hierro (III), su química y mineralogía exacta son complejas y variables (Gray, 1998, en Jiménez *et al.*, 2009; Valente *et al.*, 2009b).



Fotografía 1.2. Imagen ilustrativa del *yellow boy* en el río Odiel.

El AMD es el principal problema ambiental que provoca la actividad minera actualmente a nivel mundial, por la amenaza que representa tanto para el medio ambiente como para la salud humana, principalmente por los elevados contenidos metálicos (Wang, 2010).

Tres son las causas fundamentales de la gravedad de la contaminación por metales y metaloides (Grande *et al.*, 2005b):

- a) A diferencia de la materia orgánica, los metales no son biodegradables, por lo que permanecen en el medio contaminado de forma indefinida, salvo por procesos de transporte a otros medios.
- b) Los metales, una vez que los microorganismos y la microflora los incorporan, pueden ser retenidos por los tejidos, produciéndose el fenómeno de la bioacumulación. Así, en organismos acumuladores se han encontrado factores de concentración de 290.000 veces para el zinc, 100.000 veces para el plomo, 35.000 veces para el cobre y 500 y 100

acumulados pueden transmitirse a otras especies situadas en un nivel superior de la cadena trófica, produciéndose el fenómeno conocido como biomagnificación (Nebel *et al.*, 1999). Mediante la bioacumulación y la biomagnificación, se llegan a alcanzar valores mucho más elevados que los encontrados en el medio líquido.

c) Los metales y metaloides, desde el punto de vista de su influencia en la fisiología vegetal y animal, pueden clasificarse en esenciales y no esenciales. Así, ciertos elementos como cobre, zinc y manganeso son micronutrientes esenciales para plantas y animales y sólo llegan a ser letales a elevadas concentraciones (Begon *et al.*, 1999); el organismo los necesita dentro de un intervalo óptimo, por debajo del cual se produce estados carenciales y por encima, toxicidad. Igualmente, los metales pesados no esenciales presentan para cada individuo un valor, por debajo del cual es tolerable y por encima tóxico (Sáinz *et al.*, 2002).

Tras el cese de la actividad extractiva son necesarios trabajos de restauración que devuelvan los terrenos en los se han desarrollado las labores mineras a una situación similar a la original. En la actualidad, la legislación vigente obliga a las empresas a la presentación de un Proyecto de Restauración y a la constitución de garantías para dicha restauración. Sin embargo, en las minas abandonadas anteriores a la entrada en vigor de la normativa medioambiental, no se llevaron a cabo acciones encaminadas a la integración paisajística de las labores mineras, y en el caso de la minería metálica, no se tomaron medidas que evitasen los lixiviados ácidos, que son la causa de contaminación de numerosas redes fluviales.

En ocasiones es posible prevenir la generación de lixiviados ácidos, especialmente, en el caso de escombreras y balsas de retención, mediante la instauración de coberturas que previenen el contacto entre los sulfuros, el oxígeno y el agua (Gustafsson *et al.*, 1999; Younger *et al.*, 2002). Estas coberturas suelen ser de arcilla (coberturas secas), o de agua profunda (coberturas de agua). Sin embargo, la prevención completa de drenaje ácido no es factible en muchos casos, especialmente cuando se trata de minas subterráneas o explotaciones a cielo abierto con una gran extensión superficial, ya que lo hace económicamente inviable, y es necesaria la aplicación de tratamientos para la protección medioambiental.

Han sido innumerables los intentos de uso de tratamientos, tanto activos como pasivos, existentes en la actualidad, sin llegar a alcanzarse un resultado óptimo (Bazdanis, *et al.*, 2011; Komnitsas, *et al.*, 2012-2013; Younger, 1997-2001-2005).

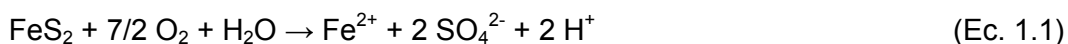
Todavía existe una gran demanda para la innovación y el desarrollo de éstos, siendo el reto más importante la evolución de métodos económicos (Younger, 2005).

1.2. PROCESOS DE OXIDACION DE SULFUROS

En general, los minerales son químicamente estables bajo las condiciones geológicas de formación, sin embargo, algunas de estas fases pueden ser químicamente inestables cuando son extraídas y expuestas a condiciones atmosféricas. En concreto, los sulfuros presentan un elevado potencial para reaccionar con el oxígeno y el agua, y su meteorización implica una serie de reacciones geoquímicas y microbiológicas encadenadas cuyo resultado es la generación de drenajes extremadamente ácidos y con elevadas concentraciones de sulfatos, metales (hierro, cobre, plomo, zinc, etc.) y metaloides (arsénico, antimonio, etc.) (Lowson, 1982; Parker y Robertson, 1999; Younger *et al.*, 2002).

Los procesos de producción de acidez se explican, en general, mediante el ejemplo de oxidación de la pirita, que es el sulfuro más abundante en la naturaleza y que se encuentra en numerosas operaciones mineras (Figura 1.1).

Singer y Stumm propusieron el desarrollo de la reacción de oxidación en cuatro etapas, según las siguientes reacciones:



La oxidación de la pirita por oxígeno atmosférico produce un mol de hierro ferroso, dos moles de hidrogeniones y dos moles de sulfato, por cada mol de pirita oxidada (Ec. 1.1).

La liberación del hierro ferroso, sulfatos y protones, provocan un incremento de la concentración de sólidos disueltos totales así como un descenso del pH. Si hay suficiente oxígeno en el medio, el Fe(II) disuelto, puede ser oxidado a Fe(III) consumiendo acidez en el proceso (Ec. 1.2).

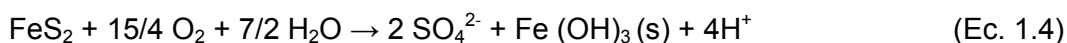


En medios con valores de pH inferiores a 3,5, pueden existir cantidades significativas de ión férrico en solución, pero si el pH aumenta, el ión férrico se hidroliza y precipita como hidróxido férrico (Ec. 1.3) con lo que el pH desciende aún más, debido a la generación de protones.



En medios ácidos ricos en sulfatos, se producen reacciones asociadas a la hidrólisis del ión férrico que dan lugar a la formación de sulfatos de hierro hidratado (oxihidroxisulfatos) como la schwertmannita, la jarosita y la goethita. Estos minerales son los que forman el *yellow boy* ya citado (Fotografía 1.2).

Sumando las tres reacciones anteriores, se obtiene la reacción global (Ec. 1.4) de la que resulta que, por cada mol de pirita oxidada se liberan al medio 4 moles de protones. Por cada gramo de pirita se generan aproximadamente tres gramos de ácido sulfúrico, lo que da una idea del nivel de acidificación del agua que puede llegar a provocar este proceso.



Los sulfuros metálicos que intervienen en la generación de aguas ácidas presentan distintos grados de reactividad. Inicialmente la oxidación de la pirita está basada en la adsorción del O_2 y el H_2O por el Fe(II) de la superficie del mineral. Como resultado se forman en su superficie, oxihidróxidos intermedios dependiendo del pH. En condiciones ácidas, el mayor oxidante de la pirita es el Fe(III) según la ecuación 1.5 (Singer y Stumm, 1970), mientras que en condiciones cercanas a la neutralidad, lo es el oxígeno.



Por tanto, la formación de oxihidróxidos en la superficie del mineral procedente de la oxidación de pirita por oxígeno, favorece que el sulfuro siga oxidándose, esta vez por Fe(III) (Ec. 1.5).

El Fe(II) procedente de la ecuación 1.5 puede ser re-oxidado por el oxígeno disuelto disponible, perpetuando el ciclo representado. Si el oxígeno se agota, la ecuación 1.5 puede proseguir porque la Ecuación 3 está en equilibrio, de manera que en la solución puede resultar la especie Fe(II) como la predominante (Younger *et al.*, 2002).

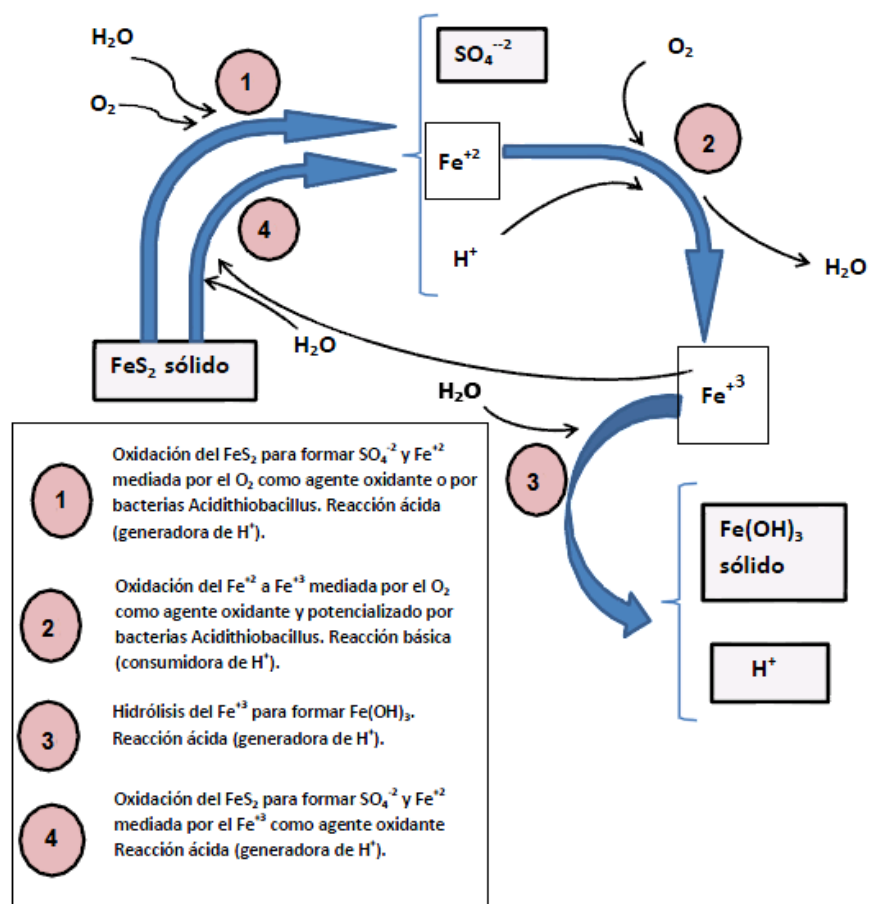


Figura 1.1. Esquema simplificado de la química del drenaje ácido de mina (Guevara, 2012).

En aguas muy ácidas, la oxidación del hierro ferroso puede verse incrementado por bacterias acidófilas, tales como la *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*, etc., que actúan como catalizadores de la oxidación del ión ferroso (Leduc *et al.*, 2002).

La actividad de estas bacterias se desarrolla de forma óptima en ambientes ácidos, mientras que la oxidación química es más rápida en ambientes neutros y alcalinos. Una vez desencadenado el proceso, como en las distintas reacciones que lo componen se liberan protones que acidifican progresivamente el ambiente, la oxidación biológica se acelera, mientras que la química se ralentiza (Figura 1.2). El pH y la temperatura son dos factores de control de la velocidad de reacción muy relacionados con la actividad bacteriana. En general, el máximo rendimiento de la reacción se produce a temperaturas medias y altas, entre 15 y 35°C (Blowes *et al.*, 2004) y en un rango de pH de entre 2,5 y 3,5 (Sarmiento, 2007).

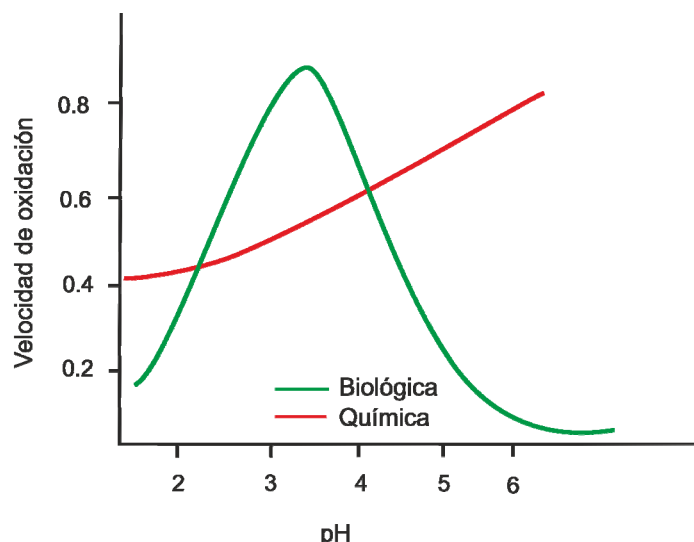


Figura 1.2. Ritmo de oxidación de la pirita (Singer y Stumm, 1970).

Según Espinosa *et al.*, 2010, existen además otros factores que afectan a la rapidez de oxidación de la pirita y por tanto al control de la generación ácida (Figura 1.3):

a) Área superficial de exposición: Ésta es una de las variables más importantes que controlan la rapidez de la oxidación. Al disminuir el tamaño de partícula se incrementa la velocidad de reacción. Hay una relación lineal entre el tamaño de partícula y la velocidad de reacción.

b) pH y concentración de oxígeno: La concentración de oxígeno afecta a la oxidación de la pirita. La siguiente relación empírica muestra la velocidad de oxidación de la pirita en la que se relacionan el pH y la concentración de oxígeno (Ec 1.6):

$$\text{Velocidad} = 10^{-8.19} [\text{O}_2]^{0.5} / [\text{H}^+]^{0.11} \quad (\text{Ec.1.6})$$

Donde $[\text{O}_2]$ y $[\text{H}^+]$ son las concentraciones de oxígeno e hidrógeno en solución.

c) Concentración de ion férrico: La velocidad de oxidación de la pirita por Fe^{3+} depende de la presencia de oxígeno en la solución. Con una alta relación de $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ y en presencia de oxígeno, la velocidad de oxidación se incrementa. El ion férrico es más efectivo en la oxidación de la pirita que el oxígeno, según indica la Figura 1.3.

Esto puede ser debido a que el ion férrico puede unirse directamente a la superficie de la pirita realizándose más fácilmente la transferencia de electrones. Además, las especies intermedias oxidantes del azufre como el ion sulfoxilo ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) es más fácilmente oxidado por el ion férrico que por el oxígeno.

d) Temperatura y energía de activación química requerida para iniciar la generación ácida: Es importante recordar que la oxidación de la pirita produce una fuerte reacción exotérmica, por lo que esta velocidad de reacción está vinculada con la ecuación de Arrhenius (Ec. 1.7):

$$k(T) = A e^{-E_a/RT} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

donde:

$k(T)$: Constante cinética (dependiente de la temperatura)

A: Factor pre-exponencial o factor de frecuencia. Indica la frecuencia de las colisiones.

E_a : Energía de activación, expresada en J/mol.

R: Constante universal de los gases. Su valor es $8,3143 \text{ J}^{\circ}\text{K}^{-1}\cdot\text{Mol}^{-1}$.

T: Temperatura absoluta [$^{\circ}\text{K}$]

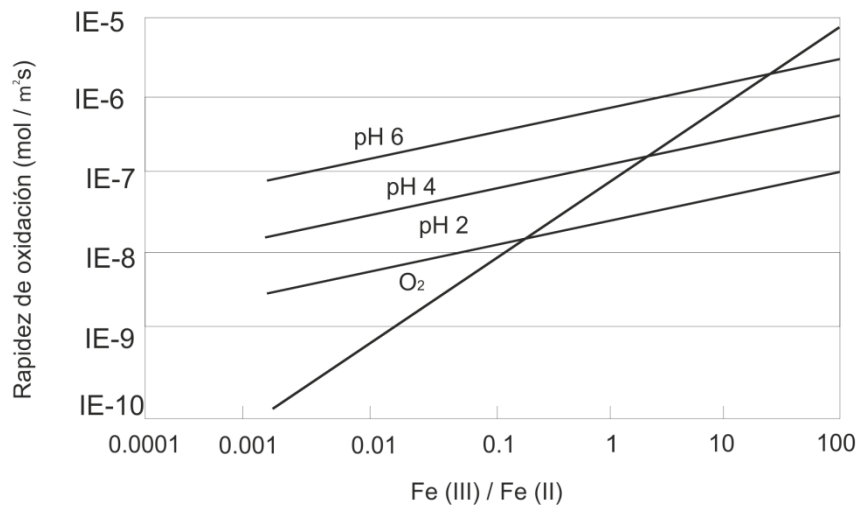


Figura 1.3. Rapidez de oxidación y su dependencia con la relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ (Espinosa *et al.*, 2010).

1.3. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL ARTE

La literatura científica está repleta de numerosos estudios encaminados a cuantificar los efectos ambientales del AMD en el medio hídrico, desde el punto de vista de los procesos que tienen lugar en las aguas afectadas (Campaner Luiz-Silva, 2009; Cánovas *et al.*, 2008; Cerón 2013a-b; de la Torre *et al.*, 2009, 2010, 2014 a-b-c; Egal *et al.*, 2010; Grande *et al.*, 2000a-b, 2003a-b, 2005a-b-c, 2010a-b-c-d-e, 2011a-b, 2013a-b, 2014a-b; Hinton and Veiga, 2001; Hubbard *et al.*, 2009; Jiménez *et al.*, 2009; Lobo *et al.*, 2014; Loredó *et al.*, 2010; Nieto *et al.*, 2007; Ochieng *et al.*, 2010; Ostalé 2014; Ostalé *et al.*, 2014; Romero *et al.*, 2011; Salmerón., 2014; Santisteban *et al.*, 2012, 2013, 2014a-b; Sáinz *et al.*, 2003a; Valente *et al.*, 1996, 2009, 2012, 2014; Younger, 2001, 2002), en los sedimentos (Borrego *et al.*, 2002; Couceiro and Schettini, 2010; López-González *et al.*, 2006; Resongles *et al.*, 2014; Ruiz *et al.*, 2009; Vicente-Martorell *et al.*, 2008) o en la biota (Amaral-Zettler *et al.*, 2011; Casiot *et al.*, 2009; Gray and Delaney, 2010; Gunn *et al.*, 2010; Hafs *et al.*, 2010; Hao *et al.*, 2010; Hinton and Veiga, 2000 Silva *et al.*, 2000; Valente *et al.*, 2007, 2013b).

Aunque los más frecuentes ejemplos de contaminación por AMD proceden de EE.UU. y Canadá, este problema afecta igualmente a numerosos países de Sudamérica, África, Europa, Oceanía y en general a aquellas regiones con una alta actividad minera en yacimientos con presencia de sulfuros, pudiendo ocurrir no sólo en la minería de la pirita, sino en la minería del oro, plata, cobre, zinc, plomo, uranio y carbón, en menor medida.

En USA, el AMD constituye un problema de primer orden de contaminación difusa. En este país, están afectados por esta clase de contaminación un total de más de 17.000 Km de ríos repartidos por casi 20 estados de la Unión. Solamente en Pennsylvania, 4.000 Km de cursos fluviales se encuentran contaminados por AMD (Sainz, 2003). Dentro de este marco general, pueden destacarse, como casos mas conocidos, los generados por las cuencas carboníferas de Pennsylvania; por las minas de sulfuros de plomo y zinc del distrito minero de Picher, entre Oklahoma y Kansas; por Bunker Hill, mina de plomo y zinc en Idaho; igualmente, la contaminación producida por las minas de carbón y de zinc en el suroeste de Illinois; Clear Creek en Colorado; Iron Mountain en California, y la mina de oro de Richmond Hill, en Dakota del Sur son paradigmas de AMD. En Canadá, entre los numerosos casos de contaminación que afectan fundamentalmente a diez estados, son especialmente conocidos los del río Tsolum, en la Columbia Británica, por lixiviados de residuos piríticos de una mina de cobre, Mount Washington o la contaminación producida por las minas Equity Silver, y Britannia,

Coast Copper; Windy Craggy en Ontario, la de mina Doyon en Quebec, Manitoba y Vangorda Plateau en Yukón. En Australia cientos de explotaciones mineras de carbón, uranio, cobre, zinc, etc., producen AMD, siendo clásicos los ejemplos de las minas de Rum Jungle, Brukunga, Captain Flat, Gregory, Peko y Mt. Morgan así como la mina de Mt. Lyell, de cobre, oro y plata, en Tasmania (Sáinz *et al.*, 2003).

En otros países caben destacar, los drenajes ácidos producidos en las innumerables minas de carbón de Escocia (Woulds y Ngwenya, 2004) y metalíferas de Gran Bretaña, en relación a la minería metálica en Inglaterra (Jarvis y Younger, 2000; Younger *et al.*, 2005). Polonia, con la contaminación producida en los ríos Vístula y Oder, por las casi 70 minas de carbón de la Alta Silesia (Motyka y Postawa, 2000), o la generada en las minas de uranio de la República Checa. Destacan también los drenajes ácidos de las minas de hierro de Lorraine y de sulfuro de plomo de Carnoulès (Casiot *et al.*, 2003), y las minas de Morvan (Monna *et al.*, 2004) en Francia. Los producidos en Alemania por las minas de lignito (Knöller *et al.*, 2004), así como los drenajes procedentes de las más de 1000 pequeñas minas de sulfuros de Suecia. También destaca Italia, con las minas de Libiola (Dinelli *et al.*, 2001; Accornero *et al.*, 2005); la de los depósitos mineros del norte y centro de Perú, con su abundancia en enargita y los problemas ambientales creados por las minas de cobre de Cuajone y Toquepala en este país, y las minas de estaño de Oruro en Bolivia, entre otros (Van Damme *et al.*, 2008).

Con respecto a España, en Galicia, Asturias y País Vasco se encuentran ejemplos relacionados con minas de carbón (Monterroso y Macías, 1998) y de mercurio (Loredo *et al.*, 2005). Sin embargo, los principales problemas de drenaje ácido de mina están asociados a la presencia del Cinturón Pirítico Ibérico o Faja Pirítica Ibérica, de 230 km de longitud y 40-60 km de anchura, que constituye una de las comarcas metalogenéticas más importantes del mundo. La intensa actividad minera, superficial y subterránea, ha dejado, en las cuencas de los cauces afectados, un legado de 86 minas abandonadas, de las cuales varias se encuentran en proyecto de reapertura, y 2 minas en actividad, con una superficie total de afección próxima a 4850 ha (Pérez-Ostalé, 2014). Esta intensa actividad minera ha acelerado el proceso natural de desulfuración de la pirita, al aumentar la superficie de contacto por las labores mineras y disminuir la granulometría. La actividad extractiva genera un volumen de minerales, residuos y efluentes que constituyen las causas antrópicas de la contaminación de los ríos Tinto y Odiel y sus afluentes (Sáinz *et al.*, 2003).

Se han realizado muchos estudios relacionados con la calidad del agua en los ríos Tinto y Odiel. Entre otros, se pueden consultar los trabajos de: Aroba *et al.*, (2007); Cánovas *et al.*, (2008); de la Torre *et al.*, (2009, 2010, 2014a-b); Grande *et al.*, (2000a-b, 2003a-b, 2005a-b-c, 2010a-b-c-d-e, 2011a-b-c, 2013a-b, 2014a-b); Hudson-Edwards *et al.*, (1999); Jiménez *et al.*, (2009); López-Archilla, (1999); Olías *et al.*, (2004); Sáinz *et al.*, (2000a-b-c, 2002, 2003a-b, 2004, 2005); Sarmiento *et al.*, (2009); Vicente-Martorell *et al.*, (2008). Cabe destacar el trabajo de Sáinz *et al.*, (2002), donde se caracterizan la secuencia de lixiviados de una escombrera tipo de las cuencas vertientes de la Faja Pirítica Ibérica, encontrando dos periodos de lixiviado: una rápida lixiviación durante unos pocos días (1-7 días) y otra de duración variable en la que el flujo va reduciéndose. Por otro lado, Nelson y Lamothe, (1993); Elbaz-Poulichet y Dupuy, (1999); Achterberg *et al.*, (2003); Braungardt *et al.*, (2003); Sáinz *et al.*, (2004); Morillo *et al.*, (2008); Sánchez Rodas *et al.*, (2005); López González *et al.*, (2006) y Sarmiento *et al.*, (2009), entre otros, han estudiado la contaminación de los ríos Tinto y Odiel, aunque principalmente dentro de la zona de estuario. Destacan los trabajos de Sáinz *et al.*, (2004); Olías *et al.*, (2006) y Cánovas *et al.*, (2008), que calcularon la descarga de metales en el estuario de los ríos Tinto y Odiel. Hudson-Edwards *et al.*, (1999); Galán *et al.*, (2003); y Borrego *et al.*, (2004), por su parte, han estudiado la forma en que se encuentran los metales en los sedimentos del estuario.

1.4. LA FAJA PIRÍTICA IBÉRICA: 4000 AÑOS DE MINERÍA

La Faja Pirítica Ibérica constituye uno de los mayores depósitos mundiales de sulfuros (Leistel *et al.*, 1998). Esta formación geológica, con una anchura media de 50 km y una longitud de 230 km se extiende desde el noroeste de la provincia de Sevilla, cruza la provincia de Huelva y penetra en Portugal por el Alentejo, hasta el sur de Lisboa.

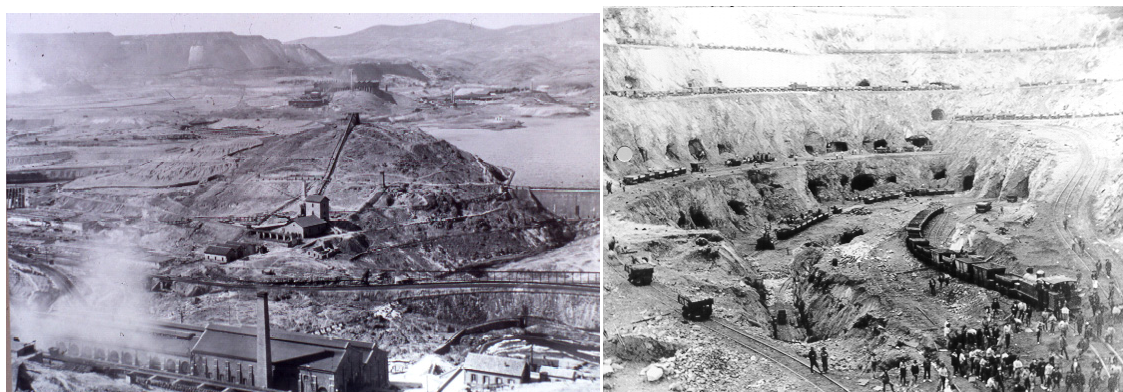
Dentro de la provincia de Huelva, y asociado al característico cinturón metalogénico que es la Faja Pirítica Ibérica, pueden encontrarse vestigios de una antigua e intensa actividad minera. Desde hace unos 4000 años estos depósitos han sido explotados, quedando en la actualidad restos de esta actividad con extensas labores mineras abandonadas, así como varios millones de toneladas de escorias antiguas de diferente composición (Pinedo, 1963), con mas de 3038 ha de escombreras (Pérez-Ostale *et al.*, 2013).

Con 4000 años de historia minera y casi 90 minas abiertas en diferentes épocas (Grande *et al.*, 2013b), la Faja Pirítica Ibérica es, sin lugar a dudas, la región más

explotada por la humanidad y una de las provincias metalogenéticas de mayor relevancia mundial. Las primeras actividades minero-metálicas se remontan al periodo Calcolítico (Nocete y Linares, 1999) donde ya existía una actividad especializada en la producción de cobre a partir de los minerales carbonatados (azurita y malaquita) óxidos (cuprita y tenorita) e incluso sulfuros (calcosina y covellita) (Sáez *et al.*, 2003; Nocete *et al.*, 2005a). El yacimiento portugués de João Marques (Gonçalves, 1987) o el poblado metalúrgico del Cabezo Juré (Alosno) investigado por el Proyecto Odiel (1991) y datado mediante Carbono-14 en el 2.500 a.C. (Nocete y Linares, 1999), son dos claros ejemplos de ello.

Los yacimientos mineros onubenses, han sido explotados desde el II milenio a.C. Tartesos, fenicios, romanos, árabes y finalmente los Reales Asientos o la Hacienda Real, se suceden en la extracción del cobre, plata hierro y oro. Si durante un periodo de más de treinta siglos, el mineral extraído se estima en 30 millones de toneladas (Pinedo, 1963), entre la segunda mitad del Siglo XIX y la primera del XX, esta cantidad se vio multiplicada por diez, cuando a partir de 1873 comienza la afluencia de capital extranjero y compañías inglesas y francesas, que se instalan en la zona. Actualmente estas cantidades se han visto notablemente incrementadas con las explotaciones de Cobre las Cruces y Aguas Teñidas.

En esta época se reactivaron y se abrieron numerosas explotaciones: Riotintio, Tharsis, La Zarza, Peña del Hierro, Concepción, Poderosa, San Telmo, Lomero-Poyatos, Cueva de la Mora, El Perrunal, San Miguel, Sotiel, El Carpio, La Joya, Confesionario, Aguas Teñidas, Romerito, mina Herrerías, Sorpresa, Campanario, Castillo del Buitrón, Angostura, etc. (Fotografía 1.3).



Fotografía 1.3. Paisajes mineros de Riotinto en 1900 (AFRT).

El transporte y exportación de los millones de toneladas de pirita extraídos obligó a la construcción de ferrocarriles, muelles de embarque, carreteras y numerosas instalaciones para el almacenamiento y tratamiento del mineral. Esta intensa actividad minera, superficial y subterránea, produjo la creación de una gran cantidad de minas con sus pozos, socavones y cortas. La pirita no exportada era aprovechada *in situ* mediante diversos procedimientos inimaginables hoy en día, como teleras que ardían durante meses, arrojando humos de SO₂ que destruían la vegetación y la salud de los habitantes de los poblados mineros; montañas de hasta 100.000 toneladas de piritas regadas con agua y cuyos lixiviados, una vez extraído el cobre, eran arrojados a los ríos cargados de contaminación; fundiciones con inmensos escoriales, etc. (Sáinz *et al.*, 2000b).

En la actualidad, la mayor parte de las instalaciones mineras, se encuentran inactivas y las labores han sido abandonadas, de forma que encontramos en la provincia de Huelva un enjambre de antiguas explotaciones cuyos residuos yacen esparcidos por el terreno, en la mayoría de las ocasiones sin medidas preventivas o correctoras, y provocando un fuerte impacto ambiental, tanto en el paisaje como en la atmósfera, en las aguas, sedimentos, flora y fauna. Las emergencias de las aguas interiores que salen por los socavones, los lixiviados de las escombreras, acopios de cenizas, balsas, canaleos y teleras, y las escorrentías de lavados, alcanzan los arroyos más próximos, y llegan finalmente a los embalses o a la Ría de Huelva, a través de un entramado de afluentes provocando la contaminación del medio receptor.

Algunos autores estiman unas reservas actuales del orden de 750 millones de toneladas de sulfuros en la Faja Pirítica Ibérica (Sáinz *et al.*, 2000a). Esto da una idea de la importancia histórica desde el punto de vista minero que ha tenido esta zona durante siglos.

En la actualidad, las buenas perspectivas del mercado del cobre ha supuesto el resurgir de la minería de sulfuros en la FPI y, con ello, la reapertura de antiguas explotaciones mineras como Aguas Teñidas o Lomero-Poyatos, y de nuevas como Cobre Las Cruces. La reapertura del complejo minero de Riotinto está en fase de aprobación de los derechos mineros, y las minas de La Zarza, San Telmo o Tharsis, entre otras, están estudiando su viabilidad.

Minas Aguas Teñidas, S.A.U. (Matsa), conforma el Grupo Minero Aguas Teñidas Herrerito, que cuenta con una mina en explotación subterránea y su posterior

tratamiento de mineral en la provincia de Huelva, así como con varios permisos de investigación en actividad. La entidad es una filial de Iberian Minerals Corporation, perteneciente a la multinacional Trafigura. Su producción anual de mineral es de 2,2 millones de toneladas y tiene como productos finales concentrados de cobre, zinc y plomo con cantidades significativas de plata. En estos momentos está inmersa en un proyecto de ampliación para alcanzar 4,4 millones de toneladas al año, además de la puesta en marcha del Proyecto Sotiel en Calañas, que comprende tres yacimientos de sulfuros polimetálicos de 4,7 millones de toneladas, que fueron explotados anteriormente de forma parcial, y cuya producción comenzará en 2015. Recientemente, se ha descubierto un nuevo yacimiento llamado Magdalena, ubicado al este de sus instalaciones y en el poblado Cueva de la Mora, que ya ha obtenido la Autorización Ambiental Unificada para el Permiso de Investigación e iniciado labores de perforación (Pérez-Ostalé, 2014).

A continuación se describen, someramente, aquellos procesos que para el beneficio de los yacimientos o para la explotación minera propiamente dicha, concentración o metalurgia, generan un volumen de minerales, residuos y efluentes que son las causas antrópicas de la contaminación de los cursos fluviales de la zona según Grande *et al.*, (2005a).

a) Escombreras: La pirita se obtenía por el laboreo a cielo abierto y subterráneo del yacimiento, en el proceso se generaban residuos de baja ley que se almacenaban en escombreras.

b) Desagües: Para mantener deprimido el nivel piezométrico y poder acceder a las labores mineras se procedía al bombeo periódico de las explotaciones evitando su inundación.

c) Trituración: El mineral arrancado, se reducía de tamaño mediante trituradoras hasta alcanzar la granulometría deseada. Aunque normalmente la trituración primaria se efectuaba en el interior de la explotación, la trituración secundaria se realizaba en el exterior, siendo el resultado final "pirita cruda", de un diámetro entre 0 y 8 mm. En algunos casos, el producto final tenía ya una proporción de finos de hasta un 30% de diámetro inferior a 1 mm, con los graves problemas que ello conlleva en época de lluvias. Las zonas contaminadas en instalaciones abandonadas comprenden, desde las de trituración propiamente dicha, hasta las de cintas transportadoras, cribas, puntos de transferencias, etc.

d) Lavado: La eliminación de estéril del mineral bruto se realizaba en un lavadero, por separación gravimétrica, produciéndose pirita y estéril. Dado que las operaciones se hacían con agua de embalses, el agua de recirculación se pasaba por un espesador para liberarla de los superfinos. Estos "estériles" finos y superfinos se almacenaban en escombreras.

e) Cementación: Para extraer el Cu se almacenaban las piritas de baja ley en montañas de hasta 100.000 t y 10 metros de altura, y se regaban periódicamente con aguas ácidas procedentes de la propia mina. Los lixiviados se recogían en balsas, haciéndolos circular a través de chatarras de hierro, con ello se producía FeSO_4 y precipitaba cobre y plata, el resto de metales contenidos en el agua salían sin precipitar, vertiéndose a los ríos.

f) Áreas mineras: Depósitos de pirita, cenizas, teleras, zonas de canaleos, balsas, restos de plantas de tratamiento mecánico y mineralúrgico, etc., que no han sido restauradas, siguen constituyendo un foco emisor de contaminación por AMD.

Todas estas operaciones producen partículas de muy variado diámetro con composiciones mineralógicas variables, desde tipo estéril, hasta composiciones piríticas puras o piríticas alteradas por extracciones selectivas de elementos. El arrastre por las escorrentías y su mezcla con los sedimentos pueden producir notables anomalías en la composición media de estas partículas.

Algunas de la minas más importantes son: minas de Ríotinto, Peña del Hierro, San Miguel, San Telmo, Angostura, Concepción, Filón Norte, Filón Sur, La Zarza, La Torerera, Sotiel Coronada, mina Herrerías, Aguas Teñidas, Aznalcollar, Castillo de las Guardas, y Cobre las Cruces entre otras, incluidas pequeñas explotaciones casi familiares, que a lo largo de 4000 años han sido explotadas en el Cinturón Pirítico Ibérico.

1.5. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

1.5.1. Localización geográfica

En Europa, los principales problemas de contaminación por metales pesados en general, en las aguas de los ríos, embalses y pozos están asociados con el drenaje ácido de mina, que se deben a la presencia de la Faja Pirítica Ibérica situada en el SO Europeo, a lo largo de Huelva, Sevilla y Sur de Portugal. La intensa actividad minera,

superficial y subterránea en esta zona metalogénica, ha dejado, en las cuencas de los ríos afectados un legado de 87 minas abandonadas, con sus pozos, socavones y cortas, sus innumerables kilómetros de túneles y sus 200 millones de m³ de residuos dispersos en centenares de escombreras y balsas mineras constituyendo todos ellos, focos contaminantes que afectan a las aguas y sedimentos de estos ríos y de la zona litoral de influencia (Sáinz *et al.*, 2004).

El problema crece en importancia cuando estas aguas contaminadas por AMD llegan a los embalses, reduciendo sus usos. La Sociedad Española de Presas y Embalses (SEPREM) reconoce oficialmente la existencia de unas 30 presas y embalses en la Faja Pirítica Ibérica, de titularidad pública y privada, de uso agrícola, industrial o urbano. Muchos de estos embalses se ubican en cauces afectados por procesos de drenaje ácido de mina, lo que supone la llegada a las presas de agua con bajo pH y elevada carga metálica y de sulfatos.

La zona de estudio en la que se desarrolla este trabajo se sitúa en la Faja Pirítica Ibérica, en las provincias de Huelva y Sevilla, abarcando diferentes embalses repartidos entre las cuencas hidrográficas del Guadiana, Guadiamar, Tinto y Odiel (Figura 1.4), siendo estos embalses seleccionados los que presentan contaminación por AMD.

Como cauces emblemáticos principales colectores de AMD podemos hablar de los ríos Tinto y Odiel. Éstos atraviesan de Norte a Sur la Faja Pirítica Ibérica y desembocan en el Océano Atlántico formando un estuario conocido como La Ría de Huelva. Sus aguas descienden con un pH medio inferior a 2,5, hasta la zona de influencia mareal, con una enorme carga metálica disuelta (de la Torre *et al.*, 2013a). En un sólo día el río Odiel transporta más metales pesados a la plataforma Atlántica, que el total de los vertidos por el desastre de Aznalcollar (Sáinz *et al.*, 2003).

El fenómeno del drenaje ácido en los ríos Tinto y Odiel es el resultado de un proceso muy complejo que afecta a los minerales sulfurosos de sus cuencas, distribuidos en dos tipos de depósitos: los correspondientes a la paragénesis pirita-cobre, formado fundamentalmente por pirita y pequeñas cantidades de calcopirita, blenda y galena, y el que corresponde a la paragénesis pirita-sulfuros polimetálicos, íntimamente relacionados con el anterior pero que contiene mayores cantidades de blenda y galena y mayor diversidad de minerales. Análisis típicos de estas dos menas se muestran en la Tabla 1.1. (D.G.I.E.M., 1986).

La acidez y la concentración de metales de estos ríos han causado la pérdida de la mayoría de las formas de vida acuática, con excepción de algunos tipos de

organismos adaptados a estos ambientes extremos (Sánchez- España *et al.*, 2005; Valente *et al.*, 2013).

| Elementos | Pirita | Sulfuros complejos |
|-----------|--------|--------------------|
| S | 46,50% | 38-44% |
| Fe | 42% | 32-40% |
| Cu | 0,70% | 0,4-4% |
| Pb | 0,80% | 1-2% |
| Zn | 1,50% | 2,5-5% |
| As | 0,30% | 0,3-0,8% |

Tabla 1.1. Análisis medio de dos tipos de menas del cinturón pirítico (D.G.I.E.M., 1986).

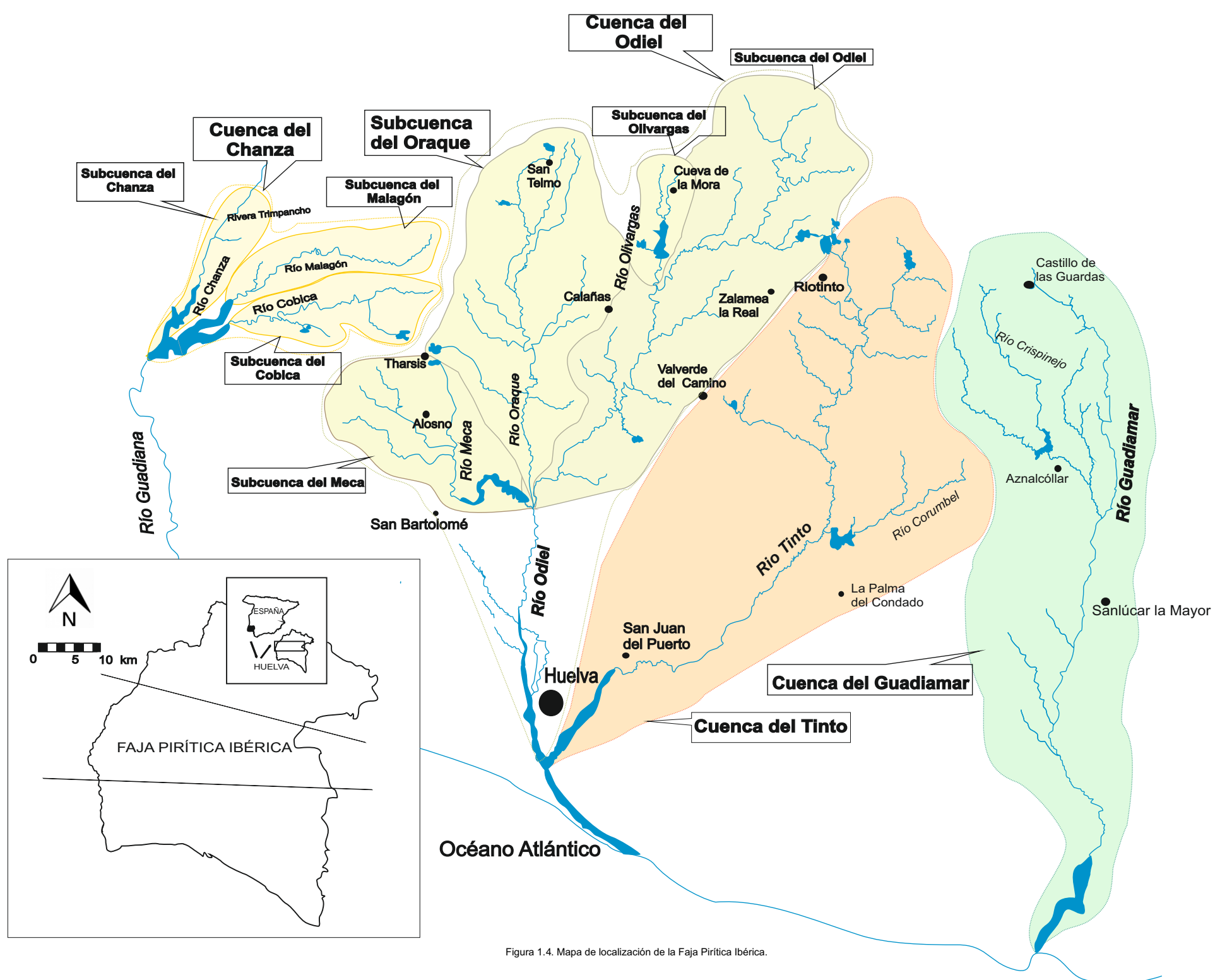


Figura 1.4. Mapa de localización de la Faja Pirítica Ibérica.

1.5.2. Localización geológica

La Península Ibérica se segmenta en diferentes unidades geológicas (Vera, 2004) (Figura 1.5): Macizo Ibérico; Cordillera Pirenaica; Cordillera Bética; Cordilleras Ibérica y Costero-Catalana y Cuencas Cenozoicas.

Dentro del Mácizo Ibérico podemos distinguir la Zona Cantábrica, la Zona Asturoccidental-Leonesa, la Zona de Galicia Tras-os- Montes, la Zona Centroibérica, la Zona de Ossa Morena y la Zona Surportuguesa.

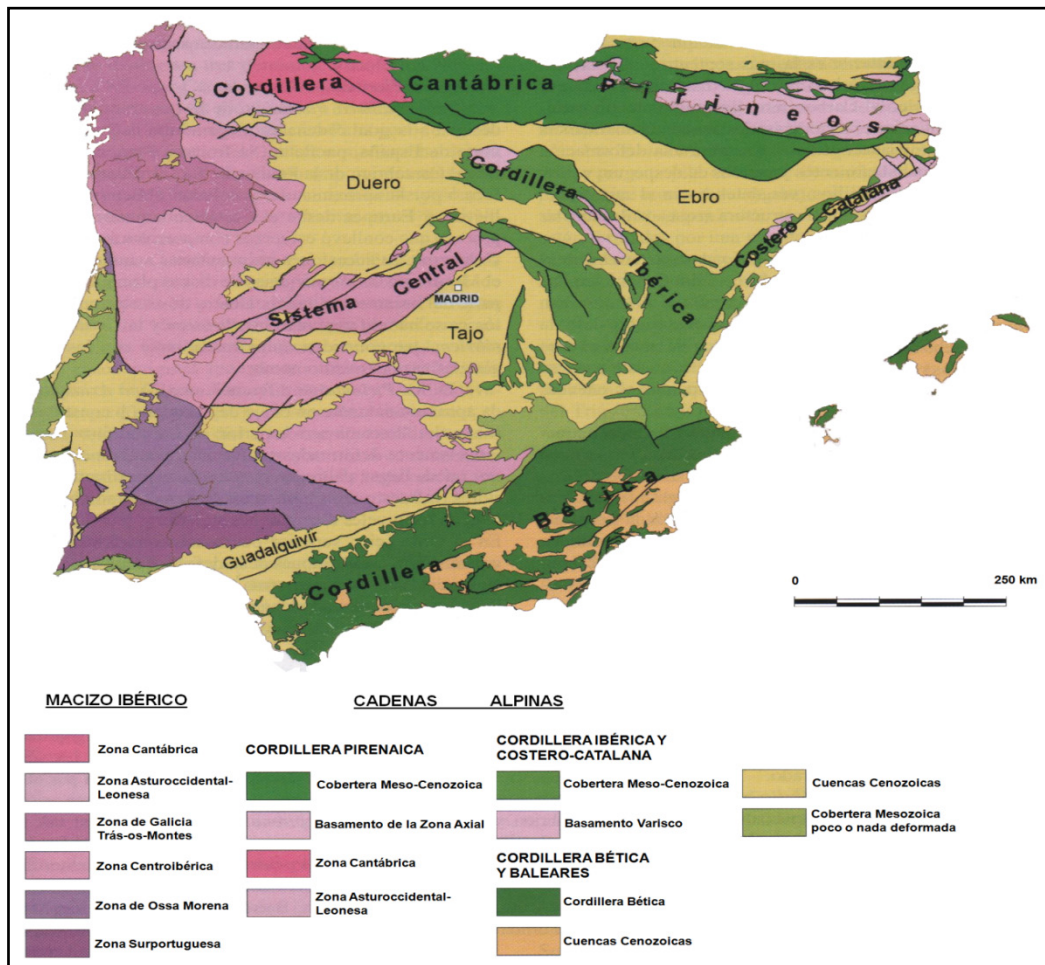


Figura 1.5. Principales unidades geológicas de la Península Ibérica y Baleares (modificado de Vera, 2004).

En la Zona Surportuguesa (ZSP) (Figura 1.6) se distinguen usualmente tres dominios con características litológicas, estructurales, y paleogeográficas diferentes. De norte a sur son (Vera, 2004): Grupo Pulo do Lobo, Faja Pirítica Ibérica (FPI) y Dominio del Suroeste Portugués (SP).

La FPI constituye una banda de 200 km de largo por 40 km de ancho que se extiende desde el Atlántico, al Sur de Lisboa, hasta las inmediaciones de Sevilla (Moreno *et al.*, 2003; Sáez *et al.*, 2005). Está formada por materiales devónicos y carboníferos que reflejan los cambios acontecidos en la cuenca Surportuguesa desde una situación prerogénica hasta la etapa sinorogénica de la evolución varisca (Moreno y González, 2004). Está caracterizada por una serie geológica relativamente sencilla (Schermerhorn, 1971) con una secuencia que incluye al menos 1000- 5000 m de rocas del Paleozoico Superior.

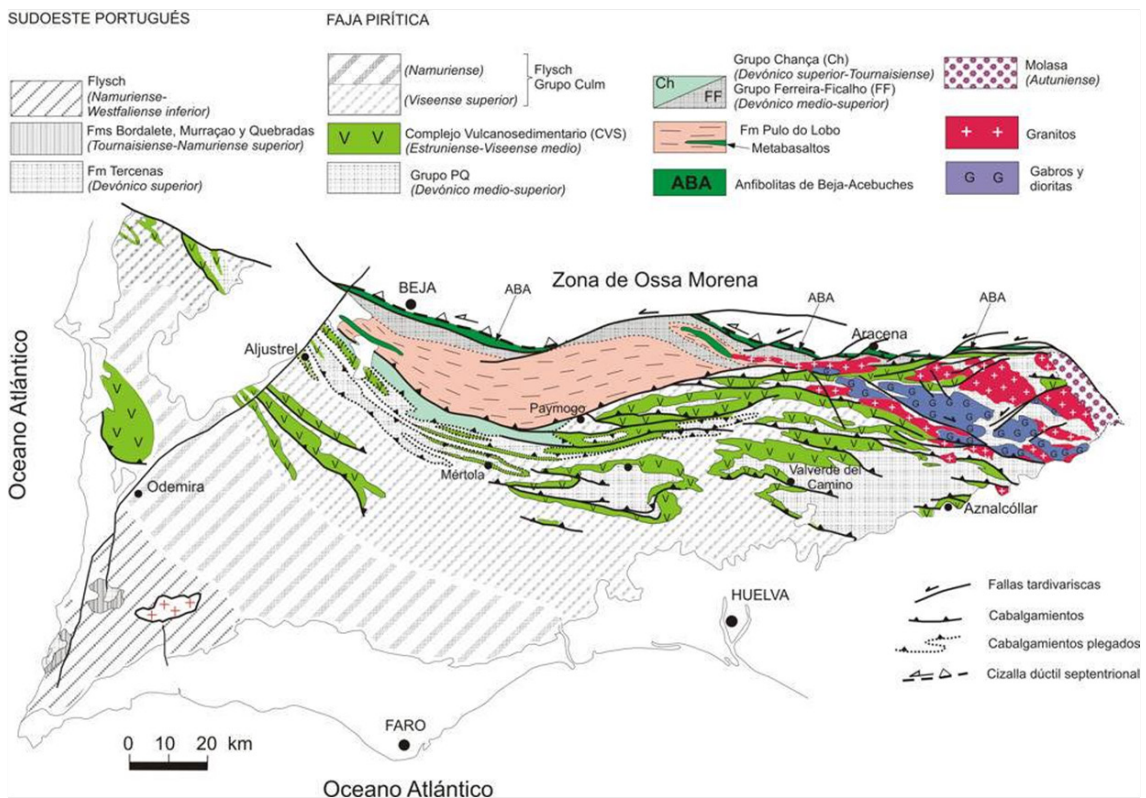


Figura 1.6. Mapa general de la Zona Surportuguesa (Vera, 2004).

De muro a techo está formada por: El Grupo PQ, formado por sedimentos devónicos pre-volcánicos; el Complejo Vulcano Sedimentario (CVS), que incluye los yacimientos de sulfuros, y el Grupo Culm, datado como Carbonífero Inferior (Figura 1.7).

Las rocas más antiguas se agrupan en el Grupo PQ de edad Frasnense a Fameniense superior. La potencia mínima es de unos 2000 m y consiste en una monótona secuencia detrítica con una alternancia de pizarra y arenisca con características de haberse depositado en una plataforma epicontinental estable. Cerca de la parte más alta aparece además una sedimentación heterogénea, que da lugar a

una serie de facies exóticas, indicadoras de ambientes altamente energéticos (IGME, 1991).

El límite entre el Grupo PQ y el Complejo Vulcano-Sedimentario (CVS) suprayacente se define por la presencia de las últimas capas ricas en arenisca o las primeras rocas de derivación volcánica. Sin embargo, en algunas áreas, la transición queda marcada por la presencia de lentejones de carbonatos arrecifales, niveles de arenisca fluvial, o flujos de gravedad sedimentarios, todos ellos indicativos de un hundimiento irregular y el desarrollo de semi-graben ligados al comienzo de la deformación compresiva (Moreno *et al.*, 1993).

El Complejo Vulcano-Sedimentario (CVS) se compone de una alternancia de rocas volcánicas félsicas y máficas, con una secuencia sedimentaria esencialmente detrítica con areniscas volcánicas. Esta secuencia ha sido datada de edad Fameniense Superior o Viseense Inferior temprano (Oliveira, 1990). El CVS no muestra una exposición continua y está confinado a varias áreas independientes, ocupando sólo el 25% de la superficie total de la FPI (Tornos, 2008).

La presencia de un afloramiento discontinuo, la alteración hidrotermal variable pero localmente intensa, y la deformación tectónica impiden conocer en detalle las relaciones y la distribución de las facies volcánicas. La secuencia global se ha agrupado tradicionalmente en tres ciclos volcánicos félsicos separados por dos máficos.

La potencia del CVS es muy variable, entre 0 y 1300 metros e incluye varias diferencias significativas entre los dominios meridional y septentrional. En el modelo de Quesada (1996) el área más meridional se caracteriza por la abundancia de pizarra y de sedimentos siliciclásticos, depositados en un ambiente con influencia continental. El área septentrional está formada por una potente secuencia volcánica con pocos niveles de pizarra. Ambos dominios estarían separados por un dominio rico en sedimentos vulcanoclásticos e interpretado como un depósito en condiciones subaéreas en un alto topográfico.

El Grupo Culm, formado por una secuencia alternante de pizarras, litoarenitas y conglomerados con características de turbiditas. Tiene una potencia de hasta 3000 m y su edad es del Viseense Superior al Pensilvaniense Medio-Superior. Representa un flysch sinorogénico de antepaís relacionado con la colisión y la inversión tectónica Varisca (Moreno, 1993).

El Grupo Culm comprende tres unidades estratigráficas volumétricamente diferenciadas (Moreno, 1987-1993; Moreno y González, 2004; Sáez, 2010):

- La Serie Pizarrosa Basal: de edad Viseense superior (Olivera y Wagner-Gentis, 1983). Secuencia mixta de vulcanoclásticas y pizarras negras con abundantes fósiles de posidonia y goniatites, y concreciones ricas en fosfatos y con potencia variable, alcanzando en algunos puntos valores próximos a 50 m y estando ausente en otros.
- La formación turbidítica de facies Culm: secuencia turbidítica de pizarras, litoarenitas y escasos conglomerados, de varios miles de metros de potencia, que representa el flysch de la Orogenia Varisca en la región. Su edad está comprendida entre el Viseense superior y el Westfaliense (Schermerhorn, 1971).
- La Unidad arenosa de plataforma severa: formada por una alternancia de pizarras y areniscas cuarzosas que se disponen en una secuencia de grano y estratocreciente hacia el techo. Esta unidad presenta escasos afloramientos.

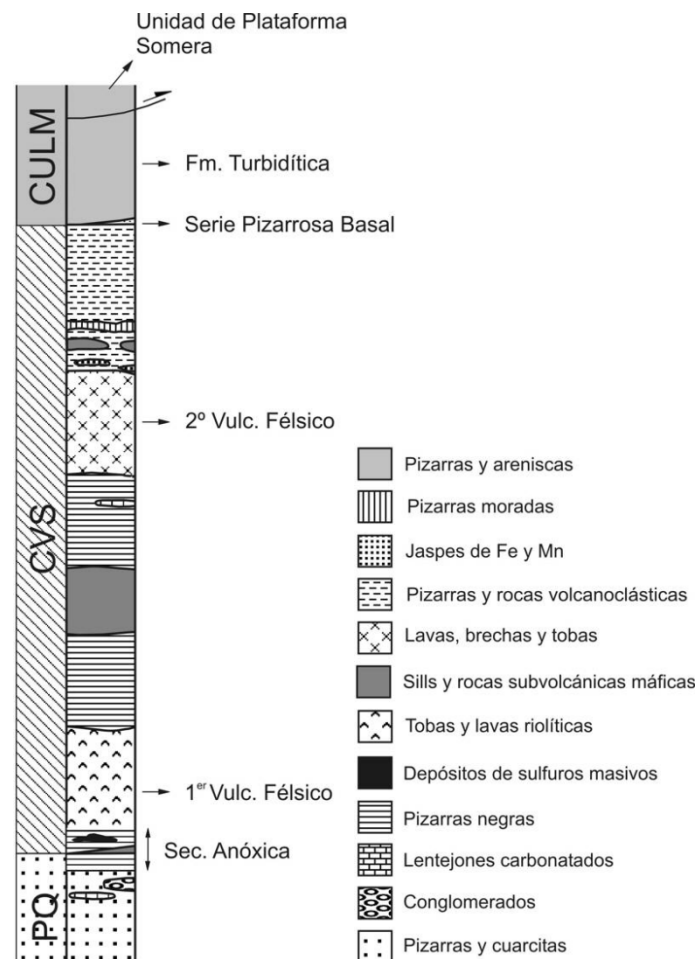


Figura 1.7. Columna Estratigráfica General de la FPI (Schermerhorn, 1971).

1.5.3. Marco hidrológico

1.5.3.1. *Embalses afectados por drenaje ácido de mina en la Faja Pirítica Ibérica*

En la actualidad, la colmatación de los embalses es un problema ambiental de primer orden, que va mas allá de la pérdida de capacidad y puede afectar al funcionamiento general de éstos como ecosistemas acuáticos (Santisteban *et al.*, 2013)

La colmatación de embalses da lugar a una serie de efectos bien conocidos, desde la pérdida de su capacidad de almacenamiento de aguas, hasta la alteración de la pendiente longitudinal del cauce, la formación de humedales, la limitación del uso recreativo o la propensión a la eutrofización de sus aguas. Pero, además, la colmatación de un embalse supone una clara pérdida de eficiencia por sí mismo con el correspondiente coste que afecta tanto a rentabilidad de la inversión inicial de la propia obra hidráulica, como a las cuentas de explotación (Palau, 2002).

Repartidos por toda la Faja Pirítica Ibérica se encuentran numerosos embalses destinados a usos urbanos, industriales, agrícolas o recreativos. Muchos de estos embalses se ubican en cauces afectados por procesos de drenaje ácido de mina, lo que supone, aguas con bajo pH y elevada carga metálica y de sulfatos. Con la llegada de los aportes de estas aguas de mina al embalse, se producirá un ascenso brusco de pH en las aguas ácidas ante el gran volumen de la cuenca receptora. Este ascenso de pH se traducirá en una violenta reducción de la capacidad de disolución en las aguas de mezcla que provocará la precipitación en el propio embalse de la mayor parte de la carga metálica transportada por el cauce minero. En cualquier caso, los precipitados metálicos se acumularán en forma de sedimento en el lecho de la presa quedando siempre sujeta a las variaciones de pH del medio y potencial redox, lo cual puede llevar a la colmatación del medio sedimentario (Grande *et al.*, 2005b).

Así, en los embalses se produce el depósito de los materiales transportados por las corrientes de agua. En este caso, son depositados tanto la carga de fondo como la carga en suspensión, pero la carga disuelta (incluida la fracción coloidal) podría llegar a ser transportada fuera del embalse por el agua liberada por éste. La presencia de cantidades significativas de materia orgánica en estos sedimentos se debe al agotamiento del oxígeno y a la reducción de sulfatos por bacterias sulfatoreductoras (Heijs y Van Gemerden, 2000). El sulfuro producido por la reducción de sulfatos puede

reaccionar químicamente con los metales para formar sulfuros insolubles, como el FeS, FeS₂, ZnS, etc. (Rickard y Morse, 2005).

Los sulfuros metálicos neoformados que se acumulan en el sedimento y la materia particulada con sulfatos transportada por los efluentes mineros, son un potencial riesgo ambiental debido a que rápidamente se pueden oxidar y liberar metales, produciendo un mayor aumento en la acidez del medio. Las variaciones de pH y de oxígeno son los factores más importantes que afectan a la movilidad de los elementos traza (Wen y Allen, 1999). La oxidación de los sedimentos del fondo puede ocurrir durante los períodos de rotación (periodos de oxigenación del agua) y también por la removilización y el transporte durante los eventos de grandes lluvias y de fuertes corrientes de agua (Santisteban *et al.*, 2013).

La incidencia del clima en el proceso contaminante del drenaje ácido de mina sobre materiales piríticos expuestos en superficie, está de sobra constatada. Las condiciones climáticas, y sobre todo las precipitaciones, son los factores controladores externos más importantes para el grado y tipo de contaminación minera en cualquier zona (Santisteban *et al.*, 2013).

En climas semiáridos, como es el caso que nos ocupa, tal y como se expone en el Capítulo 4, la construcción de presas es una de las alternativas más comunes para cubrir las necesidades de agua de la población y de la industria. La vulnerabilidad de estas superficies de agua contra la contaminación es mucho mayor que en las aguas subterráneas (Grande *et al.*, 2010d).

Como se ha expuesto con anterioridad, este trabajo de investigación se ha centrado en los embalses contaminados por AMD, situados en las distintas cuencas o subcuencas hidrográficas en las que se ha clasificado la red hidrográfica de la parte española de la FPI, y que se pasan a describir a continuación, mostrándose estos embalses en los mapas de situación de cada una de ellas

La FPI en España se encuentra limitada por dos grandes cursos fluviales: El río Guadiana al Oeste y el río Guadiamar al Este. Entre ambas cuencas además de un pequeño río, el Piedras, se encuentran las cuencas del Tinto y del Odiel. De este modo hemos considerado cuatro cuencas principales correspondientes a los ríos Chanza, Odiel, Tinto y Guadiamar (Figura 1.4.) en lugar de tres como viene siendo habitual en otros trabajos de síntesis hidroquímica sobre la red fluvial afectada por la

presencia de la Faja Pirítica (Sarmiento, 2007; Olías *et al.*, 2010), y dentro de cada una de ellas hemos procedido a la división en subcuencas hidrográficas y la descripción de sus principales embalses.

1.5.3.1.1. Cuenca del Odiel

El río Odiel, con 140 km de longitud, nace en la Sierra de Aracena, al Norte de la provincia de Huelva, recorriéndola de Norte a Sur hasta desembocar en el Océano Atlántico. Sus aguas tienen un excelente índice general de calidad en sus primeros 24 km de recorrido, a partir de ese punto pasa por mina Concepción donde comienza el proceso de contaminación por AMD, e inmediatamente aguas abajo recibe aportes de otras explotaciones vecinas como San José, San Platón, Esperanza, Poderosa o El Soldado, que incrementan el nivel de contaminación. Algo más al sur recibe los aportes de buena parte de la explotación minera de Riotinto.

La cuenca del Odiel (Figura 1.8) tiene una superficie de 2333 km², formando un conjunto de subcuencas que desarrollan una red hidrográfica con una longitud total de cursos cercana a los 1000 km (Sáinz *et al.*, 2000a). Su red hidrográfica está compuesta por numerosos afluentes: Meca, Oraque, Galaperosa, Olivargas, Escalada, Seca y Santa Eulalia por la derecha, y por su izquierda, Agrio, Villar, y los arroyos de Lagarejo, Carrasco y del Pajarón. Las subcuencas en las que se divide la cuenca del Odiel son: la subcuenca del Meca, la del Oraque, la del Olivargas, y la propia subcuenca del Odiel (Figura 1.8). Cabe señalar que en trabajos anteriores (Grande *et al.* 2013b; Sarmiento, 2007) el río Olivargas no ha sido considerado como subcuenca independiente, sino asociado como parte del área de recogida de la cuenca del Odiel. En nuestro caso, hemos considerado independizarla por sus características hidrodinámicas e hidroquímicas particulares, asociadas a los aportes ácidos procedentes de las explotaciones tan emblemáticas como Cueva de la Mora, Aguas Teñidas o el grupo La Zarza-Perrunal.



Figura 1.8. Mapa de la red fluvial de la cuenca del río Odiel, con la ubicación de los principales embalses y minas, así como de sus subcuencas.

La subcuenca del Meca presenta una extensión inferior a la del resto de subcuencas del río Odiel con 314 km², al igual que su red hidrográfica con 178 km, siendo la riera de los Agustanos, la riera del Aserrador, Dehesa-Boyal, el arroyo de las Multas, y el río Meca los afluentes más importantes. Esta subcuenca recoge la mayor parte de los lixiviados procedentes del Grupo Minero Tharsis. El río Meca, inmediatamente antes de su confluencia con Oraque y Odiel queda represado por el embalse de El Sancho. De menor envergadura, también se encuentra ubicado en esta subcuenca el embalse del Pino (Tabla 1.2) el cuál recibe aportes de estas minas.

| DATOS GENERALES | | PRESA | |
|--|------------------|---|---------|
| Nombre del embalse | DEL PINO | Tipo de Presa | - |
| Otro Nombre | - | Altura desde cimientos (m) | - |
| En fase de | - | Longitud de coronación (m) | - |
| Titular de la presa | - | Cota coronación (m) | - |
| Proyectista | - | Cota cimentación (m) | - |
| Categoría según riesgo | - | Cota cauce (m) | - |
| Fin de las obras | - | Volumen cuerpo presa (1000 m ³) | - |
| Recrecimiento | - | Nº de desagües | - |
| Coordenadas UTM 29 | 667732 - 4162635 | Capacidad desagüe (m ³ /s) | - |
| Usos del embalse | - | Nº de aliviaderos | - |
| Usuarios | - | Capacidad aliviaderos (m ³ /s) | - |
| Minas que vierten | GRUPO THARSIS | Regulación | - |
| DATOS HIDROLÓGICOS | | DATOS GEOGRÁFICOS | |
| Superficie de la cuenca (km ²) | - | Río de ubicación | - |
| Aportación media anual (hm ³) | - | Municipio | THARSIS |
| Precipitación media anual (mm) | - | | |
| Avenida de Proyecto (m ³ /s) | - | | |

Tabla 1.2. Principales características del embalse del Pino.

El embalse El Sancho posee una capacidad de 58 hm³. Se nutre de las aguas del río Meca (Fotografía 1.4), el cuál recibe a través de diferentes afluentes subsidiarios aguas contaminadas por procesos AMD procedentes de las explotaciones mineras de Tharsis. Las aguas de la presa son utilizadas con fines industriales para abastecer a la fábrica de pasta de papel situada aguas abajo a 15 Km en la localidad de San Juan del Puerto. Posee una capacidad máxima de almacenamiento de 58 hm³, ocupando las aguas embalsadas una superficie de 427 ha. La longitud de coronación del muro es de 224 metros a una cota de 56 metros sobre el nivel del mar (Tabla 1.3).

| DATOS GENERALES | | PRESA | |
|--|----------------------------------|---|-------------|
| Nombre del embalse | SANCHO, EL | Tipo de Presa | - |
| Otro Nombre | - | Altura desde cimientos (m) | 50 |
| En fase de | EXPLOTACIÓN | Longitud de coronación (m) | 224 |
| Titular de la presa | GRUPO EMPRESARIAL ENCE | Cota coronación (m) | 56 |
| Proyectista | AUXINI- E. VALLARINO Y L. ZAPICO | Cota cimentación (m) | 6 |
| Categoría según riesgo | A | Cota cauce (m) | 10 |
| Fin de las obras | 31/12/1962 | Volumen cuerpo presa (1000 m ³) | 92,3 |
| Recrecimiento | 01/01/1972 | Nº de desagües | 1 |
| Coordenadas UTM 30 | 0147481 - 4153677 | Capacidad desagüe (m ³ /s) | 8,57 |
| Usos del embalse | ABASTECIMIENTO E INDUSTRIAL | Nº de aliviaderos | 1 |
| Usuarios | - | Capacidad aliviaderos (m ³ /s) | 1088 |
| Minas que vierten | GRUPO THARSIS | Regulación | COMPUERTAS |
| DATOS HIDROLÓGICOS | | DATOS GEOGRÁFICOS | |
| Superficie de la cuenca (km ²) | 314,15 | Río de ubicación | RIVERA MECA |
| Aportación media anual (hm ³) | 32,4 | Municipio | GIBRALEON |
| Precipitación media anual (mm) | 650 | | |
| Avenida de Proyecto (m ³ /s) | 957 | | |

Tabla 1.3. Principales características del embalse El Sancho.



Fotografía 1.4. Río Meca.

La subcuenca del río Oraque posee una superficie de 612 km², con una red de drenaje de 357 km, siendo sus mayores tributarios las riveras de la Fresnera, Aguas Agrias y de la Pelada, y el arroyo Tamujoso (Figura 1.8). Esta subcuenca se muestra intensamente afectada por drenaje ácido de mina desde la cabecera, donde recibe aportes de las minas San Telmo, Lomero-Poyatos y La Joya, entre las más importantes.

En la actualidad esta subcuenca no contiene grandes obras de infraestructura hidráulica, constatándose la presencia de pequeños embalses como el embalse de La Joya, Garnacha y Grande (Tablas 1.4, 1.5, 1.6).

El río Oraque es el que actualmente presenta una menor regulación, sin embargo se ha iniciado en la confluencia de este río con el Odiel, la construcción de la presa de la Alcolea (300 hm³), que se convertirá en el mayor embalse de toda la cuenca (Cerón *et al.*, 2013). Dicha presa cubrirá las necesidades de agua de toda la provincia de Huelva, en la que existe una desigualdad entre las regiones orientales y occidentales, que obliga a establecer un flujo de recursos en sentido oeste-este. La presa de la Alcolea tendrá una capacidad de 250 hm³, perteneciendo los terrenos que conforman el vaso a los términos municipales de Gibraleón, Alosno, Villanueva de las Cruces, Calañas, Valverde del Camino, Beas y Trigueros, todos ellos en la provincia de Huelva.

En este escenario, serán transportadas hasta el punto de embalse las aguas afectadas por lixiviados ácidos de más de 45 explotaciones de sulfuros abandonadas, las cuales serán recepcionadas en él. Las estimaciones realizadas sobre la calidad del agua de

la presa de la Alcolea prevén para el futuro embalse, aguas con bajo pH y elevadas concentraciones de metales tóxicos. Por lo que estas aguas no podrían ser utilizadas directamente en la agricultura ni para ningún otro fin (Olías *et al.*, 2011). Aunque, por otro lado, la Declaración de Impacto Ambiental de la presa de Alcolea (BOE nº 33 de 8 de febrero de 2000) presupone que la carga contaminante se reducirá, inicialmente por dilución y posteriormente por decantación, y se compara con los embalses de Chanza y Olivargas, donde los metales pesados que llevan las aguas se depositan en los sedimentos del fondo, obteniéndose un agua de salida para suministro con valores admisibles de contaminantes. Realmente, el embalse de la Alcolea recibiría aportes ácidos muy superiores a estos, y no se debería suponer que la dilución será capaz de compensar la acidez del río. Asimismo, los embalses de Chanza y Olivargas presentan elevados niveles de algunos contaminantes para aguas de abastecimiento público (Grande *et al.*, 2013b).

Con objeto de reducir los índices de contaminación de las aguas, el proyecto contempla la construcción de tres diques de retención de sedimentos aguas arriba de la cerrada de la presa. No obstante, para obtener agua apta para el consumo doméstico y regadíos será necesario desarrollar tratamientos activos y pasivos que aumenten los niveles de pH y disminuyan la concentración de metales pesados de las aguas.

| DATOS GENERALES | | PRESA | |
|--|----------------------|---|-------------------|
| Nombre del embalse | LA JOYA | Tipo de Presa | Gravedad |
| Otro Nombre | - | Altura desde cimientos (m) | - |
| En fase de | - | Longitud de coronación (m) | - |
| Titular de la presa | - | Cota coronación (m) | - |
| Proyectista | - | Cota cimentación (m) | - |
| Categoría según riesgo | - | Cota cauce (m) | - |
| Fin de las obras 1989 | - | Volumen cuerpo presa (1000 m ³) | - |
| Recrecimiento | - | Nº de desagües | - |
| Coordenadas UTM 29 | 673948 - 4162109 | Capacidad desagüe (m ³ /s) | - |
| Usos del embalse Industrial | - | Nº de aliviaderos | - |
| Usuarios | - | Capacidad aliviaderos (m ³ /s) | - |
| Minas que vierten | LA JOYA | Regulación | - |
| DATOS HIDROLÓGICOS | | DATOS GEOGRÁFICOS | |
| Superficie de la cuenca (km ²) | 0,10 hm ³ | Río de ubicación | ARROYO DE LA JOYA |
| Aportación media anual (hm ³) | - | Municipio | CABEZAS RUBIAS |
| Precipitación media anual (mm) | - | | |
| Avenida de Proyecto (m ³ /s) | - | | |

Tabla 1.4. Principales características del embalse La Joya.

| DATOS GENERALES | | PRESA | |
|--|-----------------------------|--------------------------------|-------------------|
| Nombre del embalse | GARNACHA | Tipo de Presa | GRAVEDAD |
| Otro Nombre | - | Altura desde cimientos (m) | 14 |
| En fase de | EXPLOTACION | Longitud de coronación (m) | 69,5 |
| Titular de la presa | SAN TELMO IBERICA | Cota coronación (m) | - |
| Proyectista | - | Cota cimentación (m) | - |
| Categoría según riesgo | - | Cota cauce (m) | - |
| Fin de las obras | 31/12/1910 | Volumen cuerpo presa (1000 m3) | 6,5 |
| Recrecimiento | - | Nº de desagües | - |
| Coordenadas UTM 30 | 0150794 - 4192144 | Capacidad desagüe (m3/s) | - |
| Usos del embalse | ABASTECIMEINTO E INDUSTRIAL | Nº de aliviaderos | 1 |
| Usuarios | - | Capacidad aliviaderos (m3/s) | 7 |
| Minas que vierten | SAN TELMO | Regulación | NO, LABIO FIJO |
| DATOS HIDROLÓGICOS | | DATOS GEOGRÁFICOS | |
| Superficie de la cuenca (km ²) | - | Río de ubicación | |
| Aportación media anual (hm ³) | - | Municipio | CERRO DE ANDEVALO |
| Precipitación media anual (mm) | - | | |
| Avenida de Proyecto (m ³ /s) | - | | |

Tabla 1.5. Principales características del embalse Garnacha.

| DATOS GENERALES | | PRESA | |
|--|-------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Nombre del embalse | GRANDE | Tipo de Presa | - |
| Otro Nombre | - | Altura desde cimientos (m) | - |
| En fase de | - | Longitud de coronación (m) | - |
| Titular de la presa | - | Cota coronación (m) | - |
| Proyectista | - | Cota cimentación (m) | - |
| Categoría según riesgo | - | Cota cauce (m) | - |
| Fin de las obras | - | Volumen cuerpo presa (1000 m3) | - |
| Recrecimiento | - | Nº de desagües | - |
| Coordenadas UTM 29 | 6666968 - 4163937 | Capacidad desagüe (m3/s) | - |
| Usos del embalse | - | Nº de aliviaderos | - |
| Usuarios | - | Capacidad aliviaderos (m3/s) | - |
| Minas que vierten | GRUPO THARSIS | Regulación | - |
| DATOS HIDROLÓGICOS | | DATOS GEOGRÁFICOS | |
| Superficie de la cuenca (km ²) | - | Río de ubicación | RIVERA DEL AGUA AGRIA |
| Aportación media anual (hm ³) | - | Municipio | THARSIS |
| Precipitación media anual (mm) | - | | |
| Avenida de Proyecto (m ³ /s) | - | | |

Tabla 1.6. Principales características del embalse Grande.

La subcuenca de Olivargas se localiza en el sector noroccidental de la cuenca del Odiel, de la que es tributaria y se encuentra muy intensamente afectada por la presencia de importantes explotaciones mineras como Cueva de la Mora, Aguas Teñidas o el Grupo La Zarza-Perrunal.

Dos embalses se ocupan de regular las aguas en esta cuenca. Por orden de magnitud encontramos el embalse Olivargas y Puerto León (Tabla 1.7 y Tabla 1.8).

La presa de Olivargas fue construida en 1982 en el término municipal de Almonaster la Real. Se trata de una obra de gravedad con una capacidad máxima de

almacenamiento de 29 hm³ y una superficie de 240 ha con una aportación media anual de 51 hm³.

La presa de Puerto León es una obra antigua, construida en 1887. Almacena aguas del arroyo Naranjo mediante embalse por gravedad, con una capacidad máxima de 1 hm³ y sus aguas para esta máxima capacidad ocupan una superficie de 19 ha.

| DATOS GENERALES | | PRESA | |
|--|---|---|------------|
| Nombre del embalse | OLIVARGAS | Tipo de Presa | GRAVEDAD |
| Otro Nombre | - | Altura desde cimientos (m) | - |
| En fase de | - | Longitud de coronación (m) | - |
| Titular de la presa | - | Cota coronación (m) | - |
| Proyectista | - | Cota cimentación (m) | - |
| Categoría según riesgo | - | Cota cauce (m) | - |
| Fin de las obras | - | Volumen cuerpo presa (1000 m ³) | - |
| Recrecimiento | - | Nº de desagües | - |
| Coordenadas UTM 29 692451-4182522 | - | Capacidad desagüe (m ³ /s) | - |
| Usos del embalse | - | Nº de aliviaderos | - |
| Usuarios | - | Capacidad aliviaderos (m ³ /s) | - |
| Minas que vierten | CUEVA DE LA MORA; VALDELAMUSA;SORPRESA;LA ROMANITA; LAVADEO ROMERITO | Regulación | - |
| DATOS HIDROLÓGICOS | | DATOS GEOGRÁFICOS | |
| Superficie de la cuenca (km ²) | 240 ha | Río de ubicación | OLIVARGAS |
| Aportación media anual (hm ³) | - | Municipio | ALMONASTER |
| Precipitación media anual (mm) | - | | |
| Avenida de Proyecto (m ³ /s) | - | | |

Tabla 1.7. Principales características del embalse Olivargas.

| DATOS GENERALES | | PRESA | |
|--|---------------------------------|---|--------------------|
| Nombre del embalse | PUERTO LEON | Tipo de Presa | GRAVEDAD |
| Otro Nombre | - | Altura desde cimientos (m) | 23 |
| En fase de | EXPLOTACION | Longitud de coronación (m) | 139 |
| Titular de la presa | COMPAÑÍA AZUFRE Y COBRE THARSIS | Cota coronación (m) | 206,4 |
| Proyectista | - | Cota cimentación (m) | 183,4 |
| Categoría según riesgo | - | Cota cauce (m) | 185 |
| Fin de las obras | 31-12-1887 | Volumen cuerpo presa (1000 m ³) | 11 |
| Recrecimiento | - | Nº de desagües | 0 |
| Coordenadas UTM 30 | 0161634 - 4181590 | Capacidad desagüe (m ³ /s) | - |
| Usos del embalse | ABASTECIMIENTO E INDUSTRIAL | Nº de aliviaderos | 1 |
| Usuarios | - | Capacidad aliviaderos (m ³ /s) | 33 |
| Minas que vierten | ZARZA-EL PERRUNAL | Regulación | NO, LABIO FIJO |
| DATOS HIDROLÓGICOS | | DATOS GEOGRÁFICOS | |
| Superficie de la cuenca (km ²) | - | Río de ubicación | NARANJO |
| Aportación media anual (hm ³) | - | Municipio | ALMONASTER LA REAL |
| Precipitación media anual (mm) | - | | |
| Avenida de Proyecto (m ³ /s) | - | | |

Tabla 1.8. Principales características del embalse Puerto León.

La subcuenca del Odiel tiene una extensión de 1404 km². Su red hidrográfica tiene una longitud de 614 km y presenta como principales afluentes las riveras de Santa Eulalia, Seca y Escalada por su margen izquierdo, y la rivera del Villar y el arroyo Agrio por su margen derecho (Figura 1.8).

El carácter fluvial del río Odiel llega hasta el municipio de Gibraleón donde se pierde, afectando a un 10 % de la cuenca. A partir de ahí se crea un complejo estuario donde se ubica el Paraje Natural Marismas del Odiel, declarado en 1983 Reserva de la Biosfera dentro del Programa MAB de la UNESCO, y que tiene una gran importancia ecológica al ser un lugar de interés comunitario (Directiva de Habitats 92/43/CEE) y una zona de especial protección para las aves (ZEPA), según la Directiva de Aves 79/409/CEE (Cánovas, 2008). Su aporte, totalmente irregular, se ha estimado entorno a los 460 hm³/año, pero con grandísimas variaciones interanuales, presentando características casi torrenciales.

La subcuenca del Odiel alberga algunas de las mayores explotaciones de la Faja Pirítica Ibérica, como son Riotinto, Concepción, Esperanza, Poderosa, Angostura, San Miguel, El Soldado en zona de cabecera, y Tinto-Santa Rosa, El Buitrón, Los Bueyes, Almagrera, Sotiel, Torerera, Cibeles, Descamisada, o Campanario.

En la subcuenca del río Odiel encontramos el embalse Campanario (Tabla 1.9) y el embalse Gossan (Tabla 1.10).

| DATOS GENERALES | | PRESA | |
|--|--------------------|---|---------------------------|
| Nombre del embalse | CAMPANARIO | Tipo de Presa | GRAVEDAD |
| Otro Nombre | - | Altura desde cimientos (m) | 25 |
| En fase de | EXPLOTACION | Longitud de coronación (m) | 121,75 |
| Titular de la presa | JUNTA DE ANDALUCIA | Cota coronación (m) | 128 |
| Proyectista | J-OCHOA PARIAS | Cota cimentación (m) | 103 |
| Categoría según riesgo | - | Cota cauce (m) | 111 |
| Fin de las obras | 31/12/1911 | Volumen cuerpo presa (1000 m ³) | 6,87 |
| Recrecimiento | - | Nº de desagües | 0 |
| Coordenadas UTM 30 | 0161249 - 4160692 | Capacidad desagüe (m ³ /s) | - |
| Usos del embalse | RECREO | Nº de aliviaderos | 1 |
| Usuarios | - | Capacidad aliviaderos (m ³ /s) | 41 |
| Minas que vierten | CAMPANARIO | Regulación | NO, LABIO FIJO |
| DATOS HIDROLÓGICOS | | DATOS GEOGRÁFICOS | |
| Superficie de la cuenca (km ²) | 10 | Río de ubicación | AGUAS AGRIAS |
| Aportación media anual (hm ³) | - | Municipio | VALVERDE DEL CAMINO, BEAS |
| Precipitación media anual (mm) | - | | |
| Avenida de Proyecto (m ³ /s) | - | | |

Tabla 1.9. Principales características del embalse Campanario.

El embalse Gossan (Fotografía 1.5), situado al norte de las explotaciones mineras de Riotinto, constituye un depósito de almacenamiento de estériles procedentes de la planta mineralúrgica de Riotinto. Éste ocupa una superficie superior a 400 ha, y vierte a través de una salida de emergencia que deja escapar aguas en las épocas lluviosas para evitar el desbordamiento (Tabla 1.10).

| DATOS GENERALES | | PRESA | |
|--|-------------------------|--------------------------------|--------------------|
| Nombre del embalse | GOSSAN | Tipo de Presa | MATERIALES SUELTOS |
| Otro Nombre | - | Altura desde cimientos (m) | 47 |
| En fase de | CERRADA | Longitud de coronación (m) | 2832 |
| Titular de la presa | MANTESUR ANDEVALO, S.L. | Cota coronación (m) | 378 |
| Proyectista | EPTISA | Cota cimentación (m) | 331 |
| Categoría según riesgo | - | Cota cauce (m) | 0 |
| Fin de las obras | 31/12/1977 | Volumen cuerpo presa (1000 m3) | 2200 |
| Recrecimiento | - | Nº de desagües | 0 |
| Coordenadas UTM 30 | 0182597 - 4181773 | Capacidad desagüe (m3/s) | - |
| Usos del embalse | MINERIA E INDUSTRIAL | Nº de aliviaderos | 0 |
| Usuarios | - | Capacidad aliviaderos (m3/s) | - |
| Minas que vierten | GRUPO RIOTINTO | Regulación | - |
| DATOS HIDROLÓGICOS | | DATOS GEOGRÁFICOS | |
| Superficie de la cuenca (km ²) | 2,35 | Río de ubicación | |
| Aportación media anual (hm ³) | - | Municipio | MINAS DE RIOTINTO |
| Precipitación media anual (mm) | - | | |
| Avenida de Proyecto (m ³ /s) | - | | |

Tabla 1.10. Principales características del embalse Gossan.



Fotografía 1.5. Embalse Gossan.

1.5.3.1.2. Cuenca del Tinto

El río Tinto nace en la Sierra del Padre Caro, al Norte de la provincia de Huelva y posee una longitud de 101 km. Discurre por las comarcas del Andévalo Oriental y el Condado y su cuenca abarca 1646 km², de los cuales 190 corresponden a la provincia de Sevilla. Desde su nacimiento, sus aguas llevan río abajo la contaminación recibida de las explotaciones minas de Riotinto y desde cabecera, de la mina Peña del Hierro. Sus afluentes principales son los ríos Jarrama y Corumbel, en su margen izquierda, y el Arroyo Candón y Rivera Nicoba, por su margen derecho (Cánovas *et al.*, 2005). En su cuenca existen un gran número de arroyos estacionales que sólo transportan agua en el periodo húmedo. Entre estos arroyos se distinguen por su margen izquierda el arroyo del Barranco seco, arroyo del Gallego, rivera de Hornueca, Barranco de la Higuera, arroyo Giraldo y el arroyo del Fresno. Por su margen derecha confluyen el arroyo Tamujoso, rivera de Cachán, rivera del Manzano, rivera de Casa de Valverde, arroyo de Buenavista, arroyo Helechoso, arroyo de Lavapiés, arroyo Salinero y arroyo Canillas (Figura 1.9).

La cuenca minera de Riotinto viene explotándose desde hace más de 4.000 años (Ortiz, 2003). La importancia metalogénica de la cuenca ha provocado que, por sus minas, tartesos, fenicios, romanos, árabes y españoles, hayan pasado a lo largo de los siglos en busca de sus minerales. Actualmente, ninguna de las explotaciones mineras permanecen activas, encontrándose el complejo minero de Riotinto en fase de reapertura. Sin embargo, dispersas por la geografía de la zona, las explotaciones abandonadas siguen aún produciendo una grave contaminación tras una inactividad de decenas de años.

De forma global, y en comparación con la cuenca del Odiel, cabe decir que el río Tinto recoge aguas afectadas por AMD de un número mucho menor de explotaciones, quedando prácticamente restringida al área minera de Riotinto, en sus explotaciones de Levante y Peña del Hierro, aunque aguas abajo recoge lixiviados de otras minas de menor envergadura.

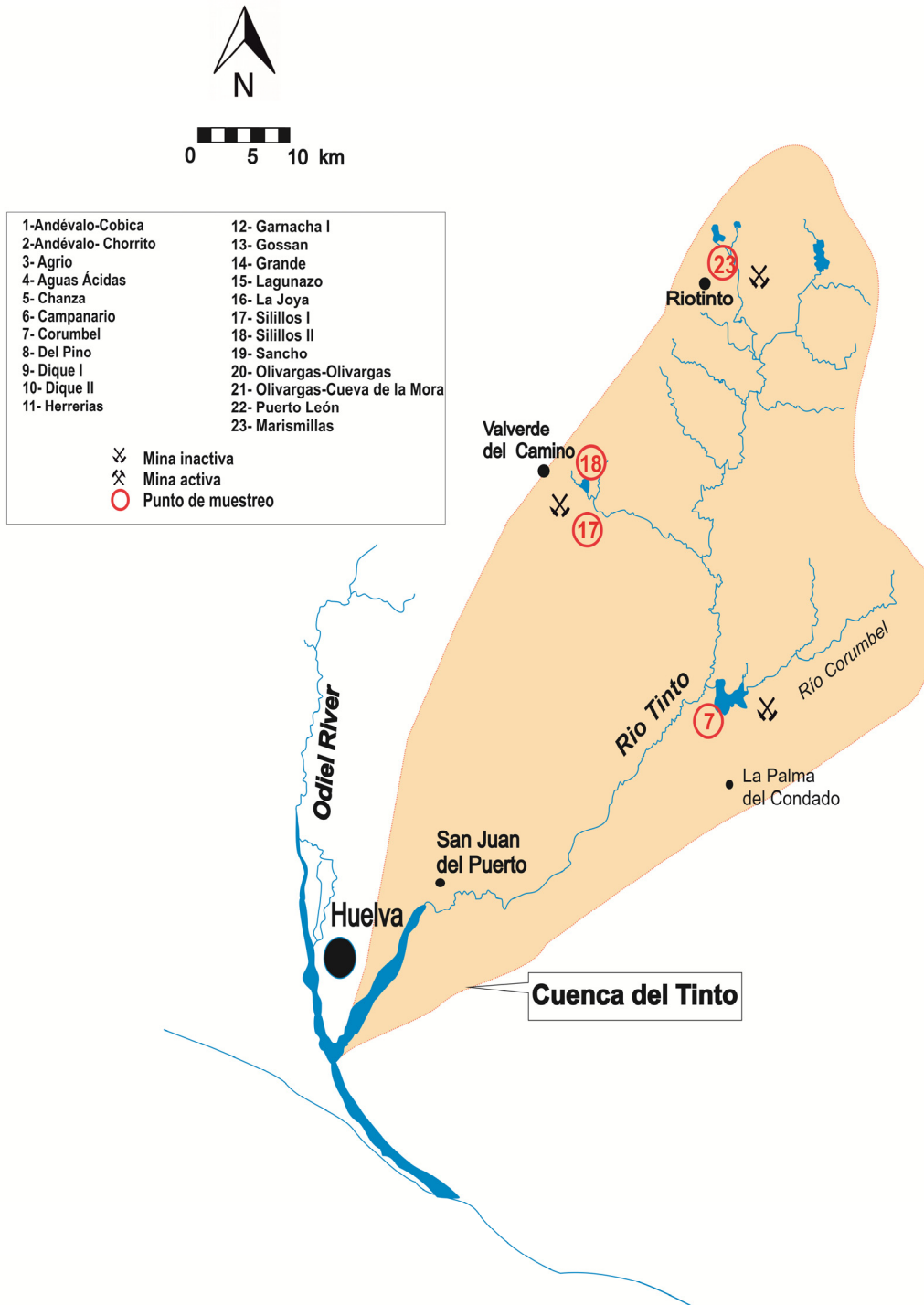


Figura 1.9. Mapa de la red fluvial de la cuenca del río Tinto, con la ubicación de los principales embalses y minas.

En la Cuenca del Tinto se ubican los embalses Marismillas, Corumbel, Silillos I y II.

La presa minera de Marismillas (Fotografía 1.6) tiene una superficie de 4,24 ha. Fue construida en 1878, para dar cabida a las aguas que fueron utilizadas posteriormente para la precipitación del cobre en las plantas de tratamiento del mineral del grupo minero Riotinto. Recibe la entrada de aguas del río Tinto, encontrándose muy afectada por el drenaje ácido de mina (Grande *et al.*, 2010a). En la actualidad se encuentra colmatada debido a los procesos de precipitación de la carga metálica que recibe (Tabla 1.11).



Fotografía 1.6. Embalse Marismillas, colmatado en la actualidad.

| DATOS GENERALES | | PRESA | |
|--|-------------------|--------------------------------|----------------|
| Nombre del embalse | MARISMILLAS | Tipo de Presa | GRAVEDAD |
| Otro Nombre | - | Altura desde cimientos (m) | 21,3 |
| En fase de | - | Longitud de coronación (m) | 90 |
| Titular de la presa | S RIOTINTO | Cota coronación (m) | 389,8 |
| Proyectista | J-OCHOA PARIAS | Cota cimentación (m) | 368,5 |
| Categoría según riesgo | - | Cota cauce (m) | 370 |
| Fin de las obras | 31-12-1878 | Volumen cuerpo presa (1000 m3) | 7 |
| Recrecimiento | - | Nº de desagües | 0 |
| Coordenadas UTM 30 | 0185770 - 4177699 | Capacidad desagüe (m3/s) | - |
| Usos del embalse | INDUSTRIAL | Nº de aliviaderos | 1 |
| Usuarios | - | Capacidad aliviaderos (m3/s) | 40,000 - |
| Minas que vierten | COMPLEJO RIOTINTO | Regulación | NO, LABIO FIJO |
| DATOS HIDROLÓGICOS | | DATOS GEOGRÁFICOS | |
| Superficie de la cuenca (km ²) | - | Río de ubicación | RIO TINTO |
| Aportación media anual (hm ³) | - | Municipio | NERVA |
| Precipitación media anual (mm) | - | | |
| Avenida de Proyecto (m ³ /s) | | | |

Tabla 1.11. Principales características del embalse Marismillas.

El embalse Corumbel (Tabla 1.12) se encuentra situado a 1 km de la confluencia del río Corumbel con el río Tinto, y suministra agua al Condado de Huelva. Otro de los embalses más destacados es el de Silillos (Tabla 1.13), en el cual fue construido un dique artificial que produjo la subdivisión de éste en dos: Silillos I, al sur, y Silillos II, al norte.

| DATOS GENERALES | | PRESA | |
|--|------------------------|---|-----------------------|
| Nombre del embalse | CORUMBEL | Tipo de Presa | MATERIALES SUELTOS |
| Otro Nombre | | Altura desde cimientos (m) | 28 |
| En fase de | EXPLOTACION | Longitud de coronación (m) | 118 |
| Titular de la presa | JUNTA DE ANDALUCÍA | Cota coronación (m) | 75,5 |
| Proyectista | P-MURGA | Cota cimentación (m) | 47,5 |
| Categoría según riesgo | A | Cota cauce (m) | 52,85 |
| Fin de las obras | 31/12/1987 | Volumen cuerpo presa (1000 m ³) | 141,6 |
| Recrecimiento | - | Nº de desagües | 1 |
| Coordenadas UTM 30 | 0183769 - 4150821 | Capacidad desagüe (m ³ /s) | 0 |
| Usos del embalse | ABASTECIMIENTO Y RIEGO | Nº de aliviaderos | 1 |
| Usuarios | - | Capacidad aliviaderos (m ³ /s) | 169,42 |
| Minas que vierten | GRUPO CORUMBEL | Regulación | NO, LABIO FIJO |
| DATOS HIDROLÓGICOS | | DATOS GEOGRÁFICOS | |
| Superficie de la cuenca (km ²) | 173,85 | Río de ubicación | CORUMBEL |
| Aportación media anual (hm ³) | 27,28 | Municipio | PALMA DEL CONDADO, LA |
| Precipitación media anual (mm) | 609 | | |
| Avenida de Proyecto (m ³ /s) | 169,42 | | |

Tabla 1.12. Principales características del embalse Corumbel.

| DATOS GENERALES | | PRESA | |
|--|---------------------------------|---|---------------------|
| Nombre del embalse | SILILLOS | Tipo de Presa | GRAVEDAD |
| Otro Nombre | - | Altura desde cimientos (m) | 21,3 |
| En fase de | EXPLOTACION | Longitud de coronación (m) | 309,5 |
| Titular de la presa | AYUNTAMIENTO DE VALVERDE CAMINO | Cota coronación (m) | 233,8 |
| Proyectista | A-GONZALEZ Y L. MANZANO | Cota cimentación (m) | 212,5 |
| Categoría según riesgo | C | Cota cauce (m) | 216 |
| Fin de las obras | 31/12/1973 | Volumen cuerpo presa (1000 m ³) | 12,5 |
| Recrecimiento | - | Nº de desagües | 1 |
| Coordenadas UTM 30 | 0171048 - 4165857 | Capacidad desagüe (m ³ /s) | - |
| Usos del embalse | ABASTECIMIENTO | Nº de aliviaderos | 1 |
| Usuarios | - | Capacidad aliviaderos (m ³ /s) | 43,2 |
| Minas que vierten | SILILLOS | Regulación | NO, LABIO FIJO |
| DATOS HIDROLÓGICOS | | DATOS GEOGRÁFICOS | |
| Superficie de la cuenca (km ²) | 8,6 | Río de ubicación | BUITRON |
| Aportación media anual (hm ³) | 1,62 | Municipio | VALVERDE DEL CAMINO |
| Precipitación media anual (mm) | 710 | | |
| Avenida de Proyecto (m ³ /s) | 37,1 | | |

Tabla 1.13. Principales características del embalses Silillos I y II.

1.5.3.1.3. Cuenca del Guadiana

La cuenca hidrológica del Guadiana ocupa una superficie de 66.890 Km². Dentro de la cuenca del Guadiana podemos distinguir las subcuencas del Chanza, la del Cobica y la del Malagón (Figura 1.10).

Los dos embalses más importantes son la presa del Andévalo y el embalse del Chanza (Tabla 1.14, 1.15). También existen otros menos importantes como son el embalse Lagunazo (Tabla 1.16) y el embalse Herrerías (Tabla 1.17). En el embalse Herrerías fueron construidos dos diques artificiales que produjeron la subdivisión de éste en tres: el propio embalse Herrerías, que es como se conoce a todo el conjunto, y los embalses Dique I de Pedrianes y Dique II de “En Medio”.



Figura 1.10. Mapa de la red fluvial de la cuenca del río Guadiana, con la ubicación de los principales embalses y minas.

La presa del Andévalo, se sitúa en la confluencia de los ríos Malagón y Cobica, ambos afluentes del Chanza en el SW de España muy cerca de la frontera con Portugal. Con una longitud de muro de 1.862 metros y una altura máxima de 76 metros sobre cimientos, presenta actualmente una capacidad de almacenamiento de 630 millones de metros cúbicos, ampliables en una segunda etapa hasta 1025 millones de metros cúbicos (López Zafra *et al.*, 2001). Su entrada en funcionamiento ha supuesto un aumento importantísimo de los recursos disponibles orientados al abastecimiento urbano y agrícola del sector occidental de Andalucía (Grande *et al.*, 2010e).

La presa se nutre de aguas del río Malagón como cauce principal, con una cuenca vertiente de 405 Km² y una diferencia de cotas, entre nacimiento y desembocadura, de 190 metros a lo largo de un recorrido próximo a 50 Km, recibiendo como afluentes principales, antes de la presa, al Arroyo Albahacar por su margen derecha y a los arroyos Cobica y Viguera por la izquierda. El régimen de caudales en el entorno aparece asociado directamente a las precipitaciones, ante la naturaleza impermeable de las rocas aflorantes en la cuenca, lo que le confiere características prácticamente torrenciales con grandes crecidas en invierno y caudal casi nulo en épocas de estiaje (Grande *et al.*, 2010e).

Por su parte, la presa del Chanza, situada aguas abajo de la anterior, fue construida en el año 1989 para fines de riego y abastecimiento urbano, ocupando sus aguas una superficie máxima de 2239 ha y permitiendo una capacidad máxima de almacenamiento de 341 hm³. En relación con el tipo de embalse, nos encontramos ante una presa de gravedad que recoge los excedentes de la presa de Andévalo, al tiempo que se nutre de las escorrentías procedentes de la cuenca vertiente del río Chanza, por encima de la unión con el Cobica. El principal foco contaminante en la parte española se debe al arroyo Trimpancho, que transporta aguas ácidas procedentes de cuatro explotaciones mineras de mediana entidad, pero que provocan una intensa afección sobre el arroyo de referencia. La unión de ambos cauces tiene lugar en el paso fronterizo conocido como vado de Volta Falsa, en el carril que une las localidades de Paymogo con Corte Pinto.

| DATOS GENERALES | | PRESA | |
|--|---------------------|---|-------------------|
| Nombre del embalse | ANDÉVALO | Tipo de Presa | GRAVEDAD |
| Otro Nombre | - | Altura desde cimientos (m) | 76m |
| En fase de | - | Longitud de coronación (m) | - |
| Titular de la presa | - | Cota coronación (m) | - |
| Proyectista | - | Cota cimentación (m) | - |
| Categoría según riesgo | - | Cota cauce (m) | - |
| Fin de las obras | - | Volumen cuerpo presa (1000 m ³) | - |
| Recrecimiento | - | Nº de desagües | - |
| Coordenadas UTM 29 | 645838 - 4166561 | Capacidad desagüe (m ³ /s) | - |
| Usos del embalse | - | Nº de aliviaderos | - |
| Usuarios | - | Capacidad aliviaderos (m ³ /s) | - |
| Minas que vierten | HERRERIAS; LAGUNAZO | Regulación | - |
| DATOS HIDROLÓGICOS | | DATOS GEOGRÁFICOS | |
| Superficie de la cuenca (km ²) | - | Río de ubicación | COBICA y CHORRITO |
| Aportación media anual (hm ³) | - | Municipio | PAYNOGO |
| Precipitación media anual (mm) | - | | |
| Avenida de Proyecto (m ³ /s) | - | | |

Tabla 1.14. Principales características de la presa del Andévalo.

| DATOS GENERALES | | PRESA | |
|--|--|---|------------|
| Nombre del embalse | CHANZA | Tipo de Presa | GRAVEDAD |
| Otro Nombre | - | Altura desde cimientos (m) | - |
| En fase de | - | Longitud de coronación (m) | - |
| Titular de la presa | - | Cota coronación (m) | - |
| Proyectista | - | Cota cimentación (m) | - |
| Categoría según riesgo | - | Cota cauce (m) | - |
| Fin de las obras 1989 | - | Volumen cuerpo presa (1000 m ³) | - |
| Recrecimiento | - | Nº de desagües | - |
| Coordenadas UTM 29 | 636339 - 4162109 | Capacidad desagüe (m ³ /s) | - |
| Usos del embalse | ABASTECIMIENTO, PESCA Y RIEGO | Nº de aliviaderos | - |
| Usuarios | - | Capacidad aliviaderos (m ³ /s) | - |
| Minas que vierten | SANTO DOMINGO; VUELTA FALSA; EL CURA LA CONDESA; SANTA ANA | Regulación | - |
| DATOS HIDROLÓGICOS | | DATOS GEOGRÁFICOS | |
| Superficie de la cuenca (km ²) | 2239 ha | Río de ubicación | CHANZA |
| Aportación media anual (hm ³) | - | Municipio | EL GRANADO |
| Precipitación media anual (mm) | - | | |
| Avenida de Proyecto (m ³ /s) | - | | |

Tabla 1.15. Principales características del embalse Chanza.

| DATOS GENERALES | | PRESA | |
|--|------------------|--------------------------------|------------------|
| Nombre del embalse | HERRERIAS | Tipo de Presa | - |
| Otro Nombre | - | Altura desde cimientos (m) | - |
| En fase de | - | Longitud de coronación (m) | - |
| Titular de la presa | - | Cota coronación (m) | - |
| Proyectista | - | Cota cimentación (m) | - |
| Categoría según riesgo | - | Cota cauce (m) 0 | - |
| Fin de las obras | - | Volumen cuerpo presa (1000 m3) | - |
| Recrecimiento- | - | Nº de desagües | - |
| Coordenadas UTM 29 | 651580 - 4165569 | Capacidad desagüe (m3/s) | - |
| Usos del embalse | - | Nº de aliviaderos | - |
| Usuarios | - | Capacidad aliviaderos (m3/s) | - |
| Minas que vierten | HERRERIAS | Regulación | - |
| DATOS HIDROLÓGICOS | | DATOS GEOGRÁFICOS | |
| Superficie de la cuenca (km ²) | 5ha | Río de ubicación | CHORRITO |
| Aportación media anual (hm ³) | - | Municipio | PUEBLA DE GUZMAN |
| Precipitación media anual (mm) | - | | |
| Avenida de Proyecto (m ³ /s) | - | | |

Tabla 1.16. Principales características del embalse Herrerías.

| DATOS GENERALES | | PRESA | |
|--|---------------------------------|--------------------------------|----------------|
| Nombre del embalse | LAGUNAZO | Tipo de Presa | GRAVEDAD |
| Otro Nombre | - | Altura desde cimientos (m) | 12 |
| En fase de | EXPLOTACION | Longitud de coronación (m) | 145 |
| Titular de la presa | COMPAÑÍA AZUFRE Y COBRE THARSIS | Cota coronación (m) | - |
| Proyectista | - | Cota cimentación (m) | - |
| Categoría según riesgo | - | Cota cauce (m) | - |
| Fin de las obras | 31-12-1880 | Volumen cuerpo presa (1000 m3) | 3 |
| Recrecimiento | - | Nº de desagües | - |
| Coordenadas UTM 30 | 0132619 - 4172077 | Capacidad desagüe (m3/s) | - |
| Usos del embalse | INDUSTRIAL | Nº de aliviaderos | 1 |
| Usuarios | - | Capacidad aliviaderos (m3/s) | 35 |
| Minas que vierten | LAGUNAZO | Regulación | NO, LABIO FIJO |
| DATOS HIDROLÓGICOS | | DATOS GEOGRÁFICOS | |
| Superficie de la cuenca (km ²) | 8 | Río de ubicación | COBICA |
| Aportación media anual (hm ³) | - | Municipio | ALOSNO |
| Precipitación media anual (mm) | - | | |
| Avenida de Proyecto (m ³ /s) | - | | |

Tabla 1.17. Principales características del embalse Lagunazo.

1.5.3.1.4. Cuenca del Guadiamar

La cuenca del río Guadiamar (Figura 1.11) ocupa la parte más occidental de la provincia de Sevilla, con origen en Sierra Morena, cerca de la localidad del Castillo de las Guardas, aunque algunos de los tributarios por la margen derecha nacen en la provincia de Huelva. Desemboca en el Brazo de la Torre del río Guadalquivir, en las proximidades del Parque Nacional de Doñana (Ferrera-Romer *et al.*, 2003). La superficie total de la cuenca asignada al Guadiamar es de 1880 km², y con una aportación media anual cifrada en 209 hm³, con un valor máximo de 724 hm³ y un

mínimo de 20 hm³, lo que muestra su gran irregularidad interanual (Martin Machuca *et al.*, 2001).

Esta cuenca, conocida por el desastre ambiental provocado por la rotura de la presa de Aznalcóllar en el año 1998, recoge aportes mineros en la parte más oriental de la Faja Pirítica Ibérica. Tan solo tres explotaciones se enmarcan dentro de esta cuenca: Castillo de las Guardas al norte, y Aznalcóllar y Cobre Las Cruces al sur de la anterior, esta última en explotación actualmente y con medidas preventivas y correctoras en el marco de la legislación actual.

En relación con las obras hidráulicas presentes, cabe destacar el embalse del Agrío construido en el año 1977 sobre el río del mismo nombre y cuyas aguas ocupan una superficie de 278 ha, contenidas por una obra de materiales sueltos con película asfáltica (Tabla 1.18). Este embalse se encuentra afectado por AMD debido a que recoge los lixiviados del complejo minero de Castillo de las Guardas.

| DATOS GENERALES | | PRESA | |
|--|---|---|-------------------------------|
| Nombre del embalse | AGRIO, EL | Tipo de Presa | MATERIALES SUELTOS, ASFÁLTICA |
| Otro Nombre | - | Altura desde cimientos (m) | 45,7 |
| En fase de | EXPLOTACIÓN | Longitud de coronación (m) | 231,5 |
| Titular de la presa | BOLIDEN APIRSA S.A. | Cota coronación (m) | 109,5 |
| Proyectista | INTECSA | Cota cimentación (m) | 63,8 |
| Categoría según riesgo | A | Cota cauce (m) | 67,5 |
| Fin de las obras | 31/12/1977 | Volumen cuerpo presa (1000 m ³) | 306 |
| Recrecimiento | - | Nº de desagües | 2 |
| Coordenadas UTM 30 | 0209532 - 4159174 | Capacidad desagüe (m ³ /s) | 16,000 - 4,900 |
| Usos del embalse | ABASTECIMIENTO E INDUSTRIAL | Nº de aliviaderos | 2 |
| Usuarios | - | Capacidad aliviaderos (m ³ /s) | 40,000 - 80,000 |
| Minas que vierten | COMPLEJO CASTILLO DE LAS GUARDAS; AZNALCOLLAR | Regulación | NO, LABIO FIJO |
| DATOS HIDROLÓGICOS | | DATOS GEOGRÁFICOS | |
| Superficie de la cuenca (km ²) | 228 | Río de ubicación | AGRIO |
| Aportación media anual (hm ³) | 38 | Municipio | AZNALCOLLAR |
| Precipitación media anual (mm) | 696 | | |
| Avenida de Proyecto (m ³ /s) | 332 | | |

Tabla 1.18. Principales características del embalse Agrío.

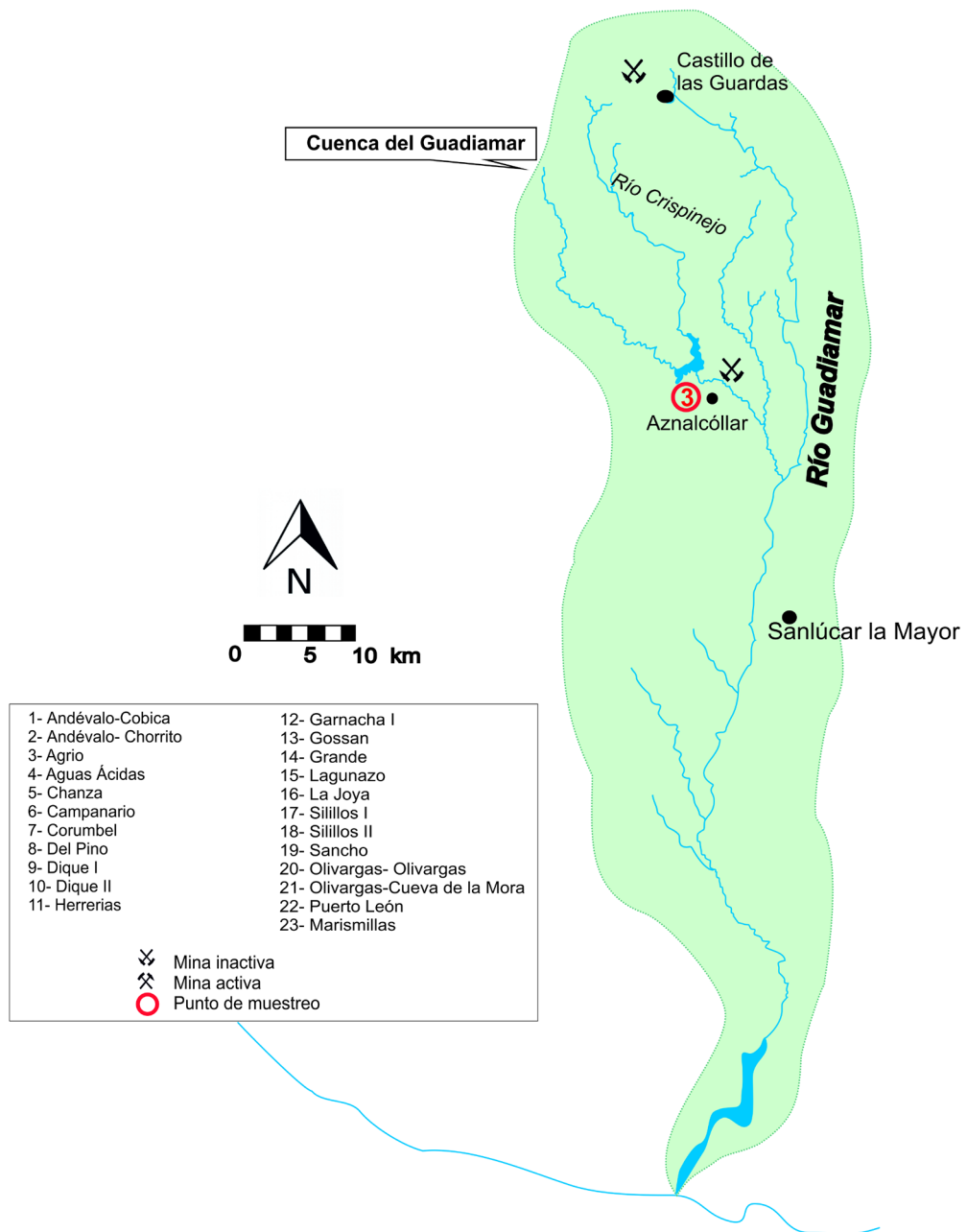


Figura 1.11. Mapa de la red fluvial de la cuenca del río Guadiamar, con la ubicación de los principales embalses y minas.

CAPITULO 2

OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO CENTRAL DE LA TESIS DOCTORAL

El objetivo central de esta tesis doctoral se concreta en caracterizar las cargas contaminantes transportadas a los embalses presentes en la red fluvial de la FPI, que se encuentran afectados por procesos AMD, así como modelizar el proceso. Este estudio dará una visión real del estado hidroquímico de los embalses, con especial atención en los contaminantes menos deseables.

Esta problemática es de especial relevancia si tenemos en cuenta que actualmente existen embalses a los que descargan diferentes cauces contaminados por AMD y que se convierten por ello en potenciales causantes de problemas de salud pública, si estos contaminantes llegan a la red de distribución para el consumo. Es de vital importancia conocer y determinar el alcance del problema.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Con el fin de poder alcanzar el objetivo central, se concretan los siguientes objetivos específicos:

- Elaboración de un inventario de embalses afectados por procesos AMD en la Faja Pirítica Ibérica.
- Caracterización del grado de contaminación de los diferentes embalses receptores de aguas afectadas por procesos AMD.
- Elaboración de un mapa de riesgos de afección global de embalses en la Faja Pirítica Ibérica.
- Caracterización hidroquímica de un medio generador de AMD, tomando como ejemplo mina Poderosa.
- Además, con el fin de modelizar el fenómeno contaminante, en un embalse tipo, se pretenden alcanzar los siguientes objetivos:

- Modelización de los cambios hidroquímicos que tienen lugar en la entrada de aguas contaminadas, así como la posible atenuación de la carga contaminante.
- Establecimiento de las posibles relaciones entre parámetros, no sólo dentro de un mismo punto de muestreo del embalse, sino también entre diferentes puntos del mismo.
- Caracterización de las variaciones hidroquímicas en la vertical del embalse tipo, para poder definir de este modo, el potencial proceso de estratificación de la carga metálica y de sulfatos.
- Propuesta de un modelo de evolución espacial de la carga contaminante.
- Descripción del contenido, la distribución y las relaciones entre los elementos que se encuentran en altas concentraciones en los sedimentos que colmatan un embalse.

CAPITULO 3

ESTUDIO CLIMATICO

3. ESTUDIO CLIMATICO

3.1. EL CLIMA COMO CONDICIONANTE DE LOS PROCESOS AMD

La incidencia del clima sobre el proceso contaminante del drenaje ácido de mina, a través de la influencia sobre materiales piríticos expuestos en superficie, está de sobra constatado y es inherente a su propia definición, ya que las condiciones climáticas, y sobre todo las precipitaciones, van a ser los detonantes y factores controladores externos más importantes para el grado y tipo de contaminación minera en cualquier zona.

Durante los meses de verano se observa un aumento de producción de acidez (McGinness y Johnson, 1993; Backes *et al.*, 1993), atribuyéndose a un aumento de la velocidad de oxidación de la pirita en esta época del año, debido al aumento de actividad que experimentan las bacterias oxidantes del hierro. Backes *et al.*, (1993) estimaron que la velocidad de oxidación durante los meses de verano era entre 5 y 10 veces más elevada que en los meses de invierno. Estos autores mostraron, además, un aumento de concentración del hierro y el sulfato, junto con el aumento de producción de acidez.

3.2. MASAS DE DATOS

La zona de estudio muestra unas características propias del clima mediterráneo semiseco, con precipitaciones anuales entorno a los 645,7 mm, temperaturas suaves con valores medios anuales de 17,2°C y una amplitud térmica de 50°C. Las precipitaciones se localizan principalmente en las estaciones de otoño e invierno, produciendo situaciones de sequía en verano y parte de la primavera.

El tratamiento de datos se ha efectuado con el programa PROCLI versión 2.0 (Lago y Rapp, 1997). Las series de datos climáticos deben tener una extensión histórica mayor de 30 años, cuando el objeto del estudio es la predicción de acontecimientos futuros en base a lo ocurrido anteriormente. En este caso se dispone de una serie de 32 años, suficiente para el estudio a realizar.

Los datos climáticos que se han tratado en este estudio han sido cedidos por el Instituto Nacional de Meteorología, y aparecen referidos a la estación denominada Alosno (Tharsis-mina) (4589),

Longitud: 7° 7' 7"

Latitud: 37° 35' 22"

Altitud: 286,0 m

La elección de la misma ha sido debido a que se trata de una de las más cercanas a las zonas de estudio, concretamente, se sitúa en las inmediaciones de Tharsis y sus datos, tanto en cantidad como en calidad, permiten realizar un estudio estadísticamente consistente. La serie climática abarca desde 1980 hasta el año 2011. Asimismo, Tharsis es una zona paradigmática por la magnitud de los procesos de degradación por AMD.

Los datos registrados con periodicidad mensual, hacen referencia a los siguientes parámetros:

Precipitación (mm)

Temperatura media mensual (°C)

Media de las temperaturas máximas mensuales (°C)

Media de las temperaturas mínimas mensuales (°C)

Temperaturas máximas absolutas mensuales (°C)

Temperaturas mínimas absolutas mensuales (°C)

Ausencia de datos: -

A continuación, en la Tabla 3.1, se muestran estos parámetros referidos a la totalidad de datos disponibles en los años estudiados, y en la Tabla 3.2 el resumen de los parámetros meteorológicos referidos a 32 años.

Año 1980

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1980 | 1 | 416 | 230 | 30 | - | - | 105 |
| 1980 | 2 | 1132 | 220 | 30 | 160 | 80 | 111 |
| 1980 | 3 | 749 | 270 | 40 | 195 | 85 | 128 |
| 1980 | 4 | 408 | 300 | 60 | 210 | 115 | 156 |
| 1980 | 5 | 777 | 300 | 80 | 220 | 100 | 163 |
| 1980 | 6 | 73 | 360 | 100 | 270 | 150 | 215 |
| 1980 | 7 | 0 | 370 | 140 | 285 | 220 | 251 |
| 1980 | 8 | 40 | 400 | 130 | 305 | 230 | 263 |
| 1980 | 9 | 165 | 400 | 110 | 280 | 180 | 244 |
| 1980 | 10 | 665 | 340 | 50 | 270 | 130 | 180 |
| 1980 | 11 | 1666 | 210 | 20 | 170 | 70 | 125 |
| 1980 | 12 | 8 | 190 | 20 | 130 | 35 | 89 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI).

Año 1981

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1981 | 1 | 43 | 230 | -20 | 155 | 35 | 101 |
| 1981 | 2 | 128 | 210 | 20 | 135 | 70 | 103 |
| 1981 | 3 | 507 | 260 | 50 | 190 | 90 | 141 |
| 1981 | 4 | 423 | 230 | 40 | 172 | 90 | 132 |
| 1981 | 5 | 155 | 290 | 70 | 205 | 105 | 161 |
| 1981 | 6 | 20 | 420 | 120 | 310 | 180 | 235 |
| 1981 | 7 | 66 | 350 | 120 | 275 | 170 | 223 |
| 1981 | 8 | 0 | 350 | 140 | 280 | 190 | 241 |
| 1981 | 9 | 194 | 350 | 110 | 270 | 160 | 215 |
| 1981 | 10 | 175 | 320 | 80 | 245 | 150 | 192 |
| 1981 | 11 | 246 | 240 | 70 | 180 | 125 | 163 |
| 1981 | 12 | 2271 | 210 | 30 | 165 | 75 | 117 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos. (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1982

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1982 | 1 | 1217 | 205 | 40 | 152 | 78 | 108 |
| 1982 | 2 | 272 | 190 | 30 | 140 | 70 | 106 |
| 1982 | 3 | 481 | 260 | 50 | 190 | 100 | 143 |
| 1982 | 4 | 167 | 220 | 60 | 165 | 110 | 136 |
| 1982 | 5 | 0 | 330 | 60 | 245 | 135 | 177 |
| 1982 | 6 | 18 | 350 | 110 | 270 | 175 | 217 |
| 1982 | 7 | 269 | - | - | - | - | - |
| 1982 | 8 | 234 | 360 | 115 | 262 | 180 | 234 |
| 1982 | 9 | 549 | 375 | 100 | 282 | 152 | 220 |
| 1982 | 10 | 90 | 290 | 50 | 210 | 140 | 169 |
| 1982 | 11 | 952 | 250 | 45 | 180 | 95 | 132 |
| 1982 | 12 | 345 | 175 | 15 | 130 | 65 | 93 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1983

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1983 | 1 | 0 | 230 | 40 | 155 | 85 | 117 |
| 1983 | 2 | 979 | 200 | -10 | 145 | 35 | 98 |
| 1983 | 3 | 40 | 270 | 40 | 190 | 105 | 151 |
| 1983 | 4 | 1066 | 280 | 50 | 185 | 100 | 139 |
| 1983 | 5 | 90 | 310 | 60 | 235 | 125 | 166 |
| 1983 | 6 | 13 | 400 | 100 | 305 | 180 | 237 |
| 1983 | 7 | 0 | - | - | - | - | - |
| 1983 | 8 | 35 | 370 | 140 | 280 | 210 | 245 |
| 1983 | 9 | 0 | 400 | 120 | 300 | 210 | 264 |
| 1983 | 10 | 935 | 330 | 110 | 250 | 155 | 211 |
| 1983 | 11 | 3364 | 220 | 100 | 175 | 125 | 152 |
| 1983 | 12 | 848 | 270 | 20 | 215 | 60 | 125 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1984

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1984 | 1 | 178 | 170 | 20 | 130 | 70 | 74 |
| 1984 | 2 | 204 | 220 | 30 | 160 | 70 | 106 |
| 1984 | 3 | 920 | 220 | 30 | 155 | 85 | 114 |
| 1984 | 4 | 401 | 260 | 50 | 185 | 120 | 156 |
| 1984 | 5 | 607 | 280 | 60 | 185 | 105 | 141 |
| 1984 | 6 | 47 | 210 | 90 | 150 | 140 | 146 |
| 1984 | 7 | 0 | 400 | 120 | 300 | 240 | 277 |
| 1984 | 8 | 0 | 410 | 120 | 315 | 215 | 260 |
| 1984 | 9 | 30 | 370 | 100 | 265 | 195 | 235 |
| 1984 | 10 | 314 | 310 | 80 | 225 | 145 | 190 |
| 1984 | 11 | 1667 | 220 | 50 | 170 | 105 | 138 |
| 1984 | 12 | 841 | 200 | 50 | 140 | 105 | 122 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1985

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1985 | 1 | 0 | 210 | -50 | 145 | 25 | 86 |
| 1985 | 2 | 943 | 220 | 60 | 160 | 95 | 124 |
| 1985 | 3 | 54 | 240 | 40 | 165 | 100 | 128 |
| 1985 | 4 | 1159 | 290 | 50 | 205 | 85 | 149 |
| 1985 | 5 | 241 | 280 | 50 | 215 | 105 | 158 |
| 1985 | 6 | 271 | 350 | 110 | 270 | 165 | 222 |
| 1985 | 7 | 82 | 390 | 150 | 295 | 215 | 262 |
| 1985 | 8 | 0 | 420 | 130 | 310 | 240 | 271 |
| 1985 | 9 | 0 | 400 | 150 | 300 | 215 | 259 |
| 1985 | 10 | 0 | 320 | 120 | 255 | 180 | 214 |
| 1985 | 11 | 1110 | 260 | 30 | 200 | 85 | 132 |
| 1985 | 12 | 1226 | 210 | 30 | 150 | 80 | 112 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1986

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1986 | 1 | 398 | 190 | 10 | 115 | 55 | 98 |
| 1986 | 2 | 775 | 180 | 10 | 130 | 70 | 99 |
| 1986 | 3 | 410 | 260 | 40 | 170 | 90 | 122 |
| 1986 | 4 | 335 | 240 | 20 | 150 | 80 | 115 |
| 1986 | 5 | 150 | 390 | 80 | 255 | 185 | 216 |
| 1986 | 6 | 33 | 370 | 90 | 285 | 180 | 220 |
| 1986 | 7 | 0 | - | - | - | - | - |
| 1986 | 8 | 0 | 370 | 110 | 265 | 215 | 244 |
| 1986 | 9 | 213 | 360 | 110 | 260 | 185 | 223 |
| 1986 | 10 | 799 | 310 | 90 | 230 | 160 | 191 |
| 1986 | 11 | 363 | 260 | 40 | 170 | 105 | 140 |
| 1986 | 12 | 196 | 190 | 20 | 140 | 60 | 100 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1987

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1987 | 1 | 717 | 180 | -20 | 125 | 30 | 92 |
| 1987 | 2 | 497 | 190 | -20 | 130 | 45 | 98 |
| 1987 | 3 | 23 | 290 | 20 | 200 | 115 | 145 |
| 1987 | 4 | 409 | 290 | 40 | 185 | 110 | 154 |
| 1987 | 5 | 108 | 360 | 80 | 240 | 150 | 188 |
| 1987 | 6 | 81 | 380 | 80 | 285 | 165 | 223 |
| 1987 | 7 | 0 | - | - | - | - | - |
| 1987 | 8 | 165 | 410 | 120 | 305 | 200 | 251 |
| 1987 | 9 | 230 | 400 | 140 | 300 | 200 | 255 |
| 1987 | 10 | 1099 | 280 | 30 | 220 | 95 | 155 |
| 1987 | 11 | 854 | 230 | 10 | 165 | 75 | 128 |
| 1987 | 12 | 1520 | 200 | 50 | 155 | 85 | 119 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos. (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1988

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1988 | 1 | 725 | - | - | - | - | - |
| 1988 | 2 | 202 | - | - | - | - | - |
| 1988 | 3 | 0 | - | - | - | - | - |
| 1988 | 4 | 115 | - | - | - | - | - |
| 1988 | 5 | 603 | - | - | - | - | - |
| 1988 | 6 | 480 | - | - | - | - | - |
| 1988 | 7 | 225 | - | - | - | - | - |
| 1988 | 8 | 0 | 420 | 110 | 290 | 200 | 266 |
| 1988 | 9 | 0 | 420 | 100 | 330 | 185 | 247 |
| 1988 | 10 | 716 | - | - | - | - | - |
| 1988 | 11 | - | - | - | - | - | - |
| 1988 | 12 | 0 | - | - | - | - | - |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1989

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1989 | 1 | 626 | 180 | 30 | 130 | 80 | 102 |
| 1989 | 2 | 243 | - | - | - | - | - |
| 1989 | 3 | 328 | - | - | - | - | - |
| 1989 | 4 | 574 | - | - | - | - | - |
| 1989 | 5 | 414 | 300 | 70 | 210 | 140 | 174 |
| 1989 | 6 | 0 | 380 | 80 | 285 | 170 | 216 |
| 1989 | 7 | 0 | 400 | 130 | 305 | 205 | 257 |
| 1989 | 8 | 32 | - | - | - | - | - |
| 1989 | 9 | 489 | 350 | 170 | 260 | 180 | 218 |
| 1989 | 10 | 2172 | 350 | 100 | 240 | 150 | 195 |
| 1989 | 11 | 1330 | 260 | 70 | 190 | 110 | 137 |
| 1989 | 12 | 2797 | 180 | 50 | 145 | 85 | 115 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1990

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1990 | 1 | 449 | 160 | 20 | 110 | 70 | 88 |
| 1990 | 2 | 0 | 220 | 30 | 30 | 80 | 120 |
| 1990 | 3 | 653 | 250 | 50 | 180 | 105 | 142 |
| 1990 | 4 | 1433 | 250 | 40 | 165 | 100 | 129 |
| 1990 | 5 | 33 | 340 | 90 | 245 | 150 | 188 |
| 1990 | 6 | 0 | 340 | 100 | 245 | 190 | 218 |
| 1990 | 7 | 0 | 360 | 110 | 270 | 230 | 248 |
| 1990 | 8 | 0 | 410 | 140 | 305 | 215 | 261 |
| 1990 | 9 | 5 | 300 | 160 | 250 | 210 | 231 |
| 1990 | 10 | 376 | 250 | 100 | 200 | 160 | 177 |
| 1990 | 11 | | 220 | 30 | 180 | 85 | 139 |
| 1990 | 12 | 349 | 170 | 10 | 115 | 60 | 90 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1991

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1991 | 1 | 149 | 170 | -10 | 125 | 40 | 92 |
| 1991 | 2 | 858 | 180 | -10 | 120 | 55 | 86 |
| 1991 | 3 | 759 | 260 | 50 | 180 | 105 | 139 |
| 1991 | 4 | 1179 | 280 | 40 | 205 | 100 | 155 |
| 1991 | 5 | 0 | 330 | 60 | 240 | 145 | 190 |
| 1991 | 6 | 275 | 410 | 100 | 305 | 175 | 233 |
| 1991 | 7 | 0 | 430 | 100 | 325 | 185 | 260 |
| 1991 | 8 | 0 | 410 | 130 | 305 | 210 | 265 |
| 1991 | 9 | 127 | 390 | 80 | 300 | 165 | 243 |
| 1991 | 10 | 785 | 300 | 70 | 220 | 135 | 165 |
| 1991 | 11 | 216 | 220 | 10 | 155 | 75 | 124 |
| 1991 | 12 | 539 | 220 | 30 | 145 | 90 | 110 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1992

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1992 | 1 | 50 | 180 | -10 | 125 | 30 | 88 |
| 1992 | 2 | 228 | 220 | 10 | 145 | 80 | 108 |
| 1992 | 3 | 240 | 300 | 20 | 195 | 100 | 143 |
| 1992 | 4 | 468 | 300 | 50 | 200 | 100 | 157 |
| 1992 | 5 | 182 | 330 | 80 | 260 | 160 | 195 |
| 1992 | 6 | 441 | 320 | 80 | 235 | 150 | 187 |
| 1992 | 7 | 0 | 390 | 140 | 310 | 220 | 264 |
| 1992 | 8 | 42 | 410 | 120 | 325 | 185 | 252 |
| 1992 | 9 | 175 | 380 | 100 | 275 | 160 | 221 |
| 1992 | 10 | 605 | 320 | 50 | 230 | 90 | 155 |
| 1992 | 11 | 10 | 240 | 40 | 185 | 105 | 146 |
| 1992 | 12 | 1215 | 180 | 40 | 135 | 70 | 108 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1993

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1993 | 1 | 376 | 200 | 10 | 130 | 65 | 98 |
| 1993 | 2 | 196 | 230 | 20 | 150 | 65 | 115 |
| 1993 | 3 | 515 | 250 | -20 | 180 | 35 | 130 |
| 1993 | 4 | 630 | 270 | 40 | 180 | 95 | 137 |
| 1993 | 5 | 1037 | 280 | 70 | 200 | 120 | 156 |
| 1993 | 6 | 51 | 360 | 100 | 265 | 170 | 213 |
| 1993 | 7 | 0 | 390 | 110 | 300 | 205 | 259 |
| 1993 | 8 | 0 | 360 | 120 | 290 | 180 | 241 |
| 1993 | 9 | 317 | 360 | 70 | 285 | 140 | 196 |
| 1993 | 10 | 3332 | 260 | 70 | 190 | 130 | 153 |
| 1993 | 11 | 557 | 230 | 50 | 180 | 95 | 129 |
| 1993 | 12 | 21 | 200 | 10 | 140 | 70 | 107 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1994

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1994 | 1 | 444 | 220 | 10 | 145 | 55 | 98 |
| 1994 | 2 | 1044 | 200 | 0 | 135 | 45 | 106 |
| 1994 | 3 | 101 | 280 | 50 | 215 | 115 | 159 |
| 1994 | 4 | 573 | 300 | 40 | 220 | 105 | 145 |
| 1994 | 5 | 750 | 325 | 80 | 238 | 120 | 177 |
| 1994 | 6 | 0 | 390 | 110 | 290 | 182 | 238 |
| 1994 | 7 | 0 | 410 | 130 | 310 | 210 | 262 |
| 1994 | 8 | 0 | 395 | 140 | 302 | 230 | 258 |
| 1994 | 9 | 261 | 360 | 90 | 265 | 155 | 214 |
| 1994 | 10 | 521 | 280 | 90 | 225 | 152 | 191 |
| 1994 | 11 | 721 | 245 | 70 | 180 | 122 | 155 |
| 1994 | 12 | 784 | 200 | -10 | 160 | 45 | 116 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1995

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1995 | 1 | 349 | 190 | 15 | 145 | 78 | 105 |
| 1995 | 2 | 548 | 200 | 20 | 155 | 75 | 121 |
| 1995 | 3 | 270 | 280 | 30 | 198 | 90 | 145 |
| 1995 | 4 | 104 | 310 | 30 | 230 | 90 | 171 |
| 1995 | 5 | 234 | 350 | 80 | 255 | 162 | 213 |
| 1995 | 6 | 230 | 365 | 110 | 282 | 195 | 227 |
| 1995 | 7 | 0 | 440 | 140 | 340 | 215 | 268 |
| 1995 | 8 | 40 | 400 | 150 | 312 | 230 | 267 |
| 1995 | 9 | 53 | 335 | 110 | 255 | 172 | 215 |
| 1995 | 10 | 101 | 320 | 110 | 245 | 175 | 206 |
| 1995 | 11 | 1899 | 255 | 60 | 208 | 105 | 162 |
| 1995 | 12 | 2918 | 185 | 45 | 160 | 88 | 125 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1996

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1996 | 1 | 4393 | 130 | 35 | 150 | 78 | 110 |
| 1996 | 2 | 501 | 185 | -10 | 120 | 45 | 94 |
| 1996 | 3 | 652 | 250 | 20 | 172 | 90 | 133 |
| 1996 | 4 | 342 | 290 | 80 | 210 | 130 | 166 |
| 1996 | 5 | 1311 | 370 | 70 | 280 | 128 | 182 |
| 1996 | 6 | 0 | 400 | 120 | 305 | 190 | 250 |
| 1996 | 7 | 45 | 420 | 140 | 320 | 215 | 268 |
| 1996 | 8 | 0 | 385 | 130 | 280 | 215 | 246 |
| 1996 | 9 | 489 | 360 | 100 | 272 | 175 | 217 |
| 1996 | 10 | 410 | 300 | 90 | 230 | 155 | 190 |
| 1996 | 11 | 306 | 290 | 30 | 215 | 85 | 144 |
| 1996 | 12 | 3893 | 210 | 10 | 150 | 55 | 113 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1997

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1997 | 1 | 1659 | 210 | 30 | 155 | 60 | 104 |
| 1997 | 2 | 0 | 250 | 40 | 190 | 105 | 137 |
| 1997 | 3 | 0 | 290 | 90 | 205 | 155 | 181 |
| 1997 | 4 | 825 | 330 | 80 | 250 | 135 | 18 |
| 1997 | 5 | 366 | 300 | 60 | 235 | 135 | 181 |
| 1997 | 6 | 478 | 340 | 10 | 250 | 170 | 209 |
| 1997 | 7 | 44 | 395 | 105 | 302 | 182 | 252 |
| 1997 | 8 | 5 | 390 | 140 | 305 | 212 | 256 |
| 1997 | 9 | 1323 | 380 | 140 | 285 | 190 | 244 |
| 1997 | 10 | 1111 | 320 | 100 | 250 | 160 | 202 |
| 1997 | 11 | 3531 | 200 | 60 | 180 | 105 | 142 |
| 1997 | 12 | 1586 | 175 | 20 | 155 | 75 | 117 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1998

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1998 | 1 | 1252 | 190 | 30 | 145 | 70 | 108 |
| 1998 | 2 | 1076 | 210 | 50 | 155 | 100 | 134 |
| 1998 | 3 | 187 | 280 | 50 | 20 | 110 | 161 |
| 1998 | 4 | 313 | 310 | 40 | 225 | 80 | 143 |
| 1998 | 5 | 677 | 310 | 60 | 230 | 122 | 180 |
| 1998 | 6 | 0 | 380 | 120 | 290 | 185 | 241 |
| 1998 | 7 | 0 | 420 | 140 | 320 | 228 | 274 |
| 1998 | 8 | 0 | 420 | 140 | 335 | 235 | 281 |
| 1998 | 9 | 605 | 370 | 140 | 280 | 188 | 234 |
| 1998 | 10 | 112 | 320 | 90 | 235 | 150 | 191 |
| 1998 | 11 | 66 | 250 | 50 | 200 | 100 | 156 |
| 1998 | 12 | 380 | 240 | 10 | 175 | 80 | 113 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 1999

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1999 | 1 | 568 | 220 | 10 | 150 | 55 | 106 |
| 1999 | 2 | 232 | 240 | 10 | 150 | 70 | 108 |
| 1999 | 3 | 940 | 270 | 30 | 190 | 90 | 138 |
| 1999 | 4 | 316 | 320 | 50 | 235 | 100 | 172 |
| 1999 | 5 | 239 | 360 | 80 | 265 | 120 | 194 |
| 1999 | 6 | 0 | 410 | 110 | 300 | 180 | 242 |
| 1999 | 7 | 40 | 420 | 150 | 320 | 215 | 267 |
| 1999 | 8 | 45 | 400 | 150 | 310 | 225 | 264 |
| 1999 | 9 | 1167 | 360 | 120 | 285 | 180 | 222 |
| 1999 | 10 | 1381 | 290 | 100 | 210 | 130 | 184 |
| 1999 | 11 | 0 | 240 | 10 | 180 | 70 | 126 |
| 1999 | 12 | 539 | 210 | 10 | 155 | 70 | 115 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 2000

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 2000 | 1 | 151 | 200 | 0 | 135 | 60 | 99 |
| 2000 | 2 | 0 | 240 | 40 | 170 | 100 | 140 |
| 2000 | 3 | 395 | 280 | 40 | 215 | 120 | 156 |
| 2000 | 4 | 2026 | 230 | 40 | 165 | 100 | 133 |
| 2000 | 5 | 1180 | 350 | 90 | 260 | 130 | 188 |
| 2000 | 6 | 0 | 380 | 90 | 290 | 175 | 242 |
| 2000 | 7 | 0 | 430 | 120 | 330 | 210 | 260 |
| 2000 | 8 | 0 | 410 | 130 | 320 | 215 | 264 |
| 2000 | 9 | 65 | 400 | 120 | 305 | 175 | 241 |
| 2000 | 10 | 365 | 325 | 80 | 232 | 130 | 181 |
| 2000 | 11 | 975 | 210 | 40 | 175 | 90 | 128 |
| 2000 | 12 | 3843 | 190 | 20 | 165 | 80 | 113 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 2001

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 2001 | 1 | 1488 | 160 | 20 | 140 | 65 | 103 |
| 2001 | 2 | 653 | 210 | 40 | 160 | 85 | 120 |
| 2001 | 3 | 1444 | 250 | 50 | 180 | 115 | 141 |
| 2001 | 4 | 50 | 280 | 50 | 205 | 110 | 162 |
| 2001 | 5 | 667 | 360 | 40 | 275 | 90 | 186 |
| 2001 | 6 | 30 | 395 | 130 | 290 | 200 | 243 |
| 2001 | 7 | 0 | 400 | 130 | 305 | 195 | 244 |
| 2001 | 8 | 0 | 400 | 130 | 305 | 200 | 252 |
| 2001 | 9 | 1055 | 360 | 120 | 270 | 175 | 220 |
| 2001 | 10 | 1177 | 270 | 100 | 215 | 140 | 184 |
| 2001 | 11 | 871 | 260 | 0 | 210 | 60 | 119 |
| 2001 | 12 | 770 | 190 | 10 | 135 | 60 | 103 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 2002

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 2002 | 1 | 631 | 200 | 40 | 140 | 75 | 109 |
| 2002 | 2 | 140 | 210 | 40 | 150 | 90 | 121 |
| 2002 | 3 | 1004 | 300 | 20 | 230 | 80 | 137 |
| 2002 | 4 | 1287 | 300 | 50 | 215 | 80 | 147 |
| 2002 | 5 | 90 | 320 | 50 | 240 | 105 | 175 |
| 2002 | 6 | 5 | 380 | 100 | 280 | 160 | 223 |
| 2002 | 7 | 0 | 390 | 120 | 295 | 195 | 251 |
| 2002 | 8 | 0 | 380 | 120 | 290 | 200 | 240 |
| 2002 | 9 | 1118 | 320 | 110 | 245 | 175 | 206 |
| 2002 | 10 | 415 | 270 | 80 | 220 | 130 | 179 |
| 2002 | 11 | 1045 | 230 | 40 | 180 | 85 | 130 |
| 2002 | 12 | 1815 | 180 | 30 | 150 | 80 | 115 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 2003

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 2003 | 1 | 500 | 200 | -20 | 145 | 35 | 89 |
| 2003 | 2 | 1097 | 180 | -10 | 130 | 45 | 92 |
| 2003 | 3 | 435 | 240 | 50 | 180 | 105 | 135 |
| 2003 | 4 | 1005 | 260 | 50 | 175 | 100 | 136 |
| 2003 | 5 | 65 | 350 | 60 | 265 | 115 | 200 |
| 2003 | 6 | 0 | 380 | 110 | 305 | 195 | 238 |
| 2003 | 7 | 0 | 430 | 130 | 340 | 205 | 251 |
| 2003 | 8 | 0 | 450 | 130 | 370 | 205 | 274 |
| 2003 | 9 | - | - | - | - | - | - |
| 2003 | 10 | 1700 | 290 | 40 | 22 | 105 | 169 |
| 2003 | 11 | 2295 | 210 | 3 | 165 | 80 | 124 |
| 2003 | 12 | 1030 | 190 | 10 | 140 | 45 | 95 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 2004

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 2004 | 1 | 255 | 180 | -10 | 130 | 40 | 92 |
| 2004 | 2 | 1050 | 200 | -10 | 150 | 50 | 104 |
| 2004 | 3 | 370 | 240 | 10 | 165 | 60 | 118 |
| 2004 | 4 | 80 | 280 | 40 | 205 | 105 | 143 |
| 2004 | 5 | 415 | 330 | 40 | 240 | 80 | 157 |
| 2004 | 6 | 10 | 420 | 130 | 325 | 195 | 252 |
| 2004 | 7 | 0 | 420 | 110 | 355 | 185 | 263 |
| 2004 | 8 | 90 | 400 | 140 | 305 | 185 | 248 |
| 2004 | 9 | 0 | 370 | 110 | 280 | 185 | 229 |
| 2004 | 10 | 1370 | 340 | 60 | 255 | 110 | 173 |
| 2004 | 11 | 205 | 240 | 40 | 180 | 100 | 127 |
| 2004 | 12 | 80 | 180 | -10 | 120 | 50 | 89 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos. (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 2005

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 2005 | 1 | 0 | 210 | -30 | 145 | 15 | 83 |
| 2005 | 2 | 180 | 190 | -10 | 120 | 25 | 81 |
| 2005 | 3 | 345 | 270 | 0 | 205 | 25 | 123 |
| 2005 | 4 | 80 | 300 | 40 | 215 | 105 | 156 |
| 2005 | 5 | 290 | 330 | 90 | 245 | 155 | 200 |
| 2005 | 6 | 40 | 390 | 130 | 305 | 205 | 252 |
| 2005 | 7 | 20 | 400 | 140 | 305 | 205 | 255 |
| 2005 | 8 | 0 | 410 | 140 | 325 | 230 | 266 |
| 2005 | 9 | 0 | 360 | 110 | 275 | 190 | 226 |
| 2005 | 10 | 1010 | 330 | 80 | 250 | 140 | 182 |
| 2005 | 11 | 986 | 210 | 20 | 160 | 65 | 117 |
| 2005 | 12 | 570 | 190 | 10 | 135 | 65 | 101 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 2006

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 2006 | 1 | 790 | 170 | -10 | 110 | 30 | 78 |
| 2006 | 2 | 475 | 200 | -10 | 140 | 50 | 92 |
| 2006 | 3 | 930 | 240 | 10 | 175 | 70 | 124 |
| 2006 | 4 | 460 | 280 | 60 | 205 | 95 | 156 |
| 2006 | 5 | 0 | 340 | 80 | 265 | 150 | 197 |
| 2006 | 6 | 400 | 370 | 130 | 275 | 185 | 224 |
| 2006 | 7 | 20 | 420 | 130 | 335 | 215 | 268 |
| 2006 | 8 | 420 | 410 | 120 | 310 | 180 | 261 |
| 2006 | 9 | 320 | 410 | 100 | 310 | 180 | 233 |
| 2006 | 10 | 2820 | 290 | 100 | 220 | 135 | 183 |
| 2006 | 11 | 1665 | 240 | 5 | 190 | 100 | 137 |
| 2006 | 12 | 380 | 180 | 0 | 140 | 45 | 92 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 2007

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 2007 | 1 | 360 | 200 | -20 | 135 | 5 | 84 |
| 2007 | 2 | 760 | 190 | 20 | 135 | 65 | 102 |
| 2007 | 3 | 275 | 220 | 20 | 155 | 70 | 115 |
| 2007 | 4 | 1305 | 280 | 30 | 200 | 80 | 136 |
| 2007 | 5 | 350 | 340 | 60 | 260 | 115 | 174 |
| 2007 | 6 | 60 | 360 | 100 | 260 | 175 | 211 |
| 2007 | 7 | 0 | 410 | 120 | 320 | 205 | 254 |
| 2007 | 8 | 513 | 370 | 130 | 290 | 190 | 238 |
| 2007 | 9 | 610 | 340 | 120 | 265 | 175 | 217 |
| 2007 | 10 | 675 | 290 | 80 | 230 | 135 | 181 |
| 2007 | 11 | 670 | 260 | 30 | 190 | 80 | 135 |
| 2007 | 12 | 50 | 180 | 20 | 125 | 70 | 94 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 2008

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 2008 | 1 | 460 | 210 | 10 | 150 | 60 | 101 |
| 2008 | 2 | 746 | 200 | 30 | 145 | 70 | 114 |
| 2008 | 3 | 400 | 230 | 0 | 165 | 65 | 110 |
| 2008 | 4 | 1528 | 280 | 40 | 220 | 95 | 147 |
| 2008 | 5 | 512 | 300 | 80 | 220 | 140 | 165 |
| 2008 | 6 | 0 | 410 | 110 | 170 | 310 | 248 |
| 2008 | 7 | 12 | 390 | 130 | 300 | 200 | 245 |
| 2008 | 8 | 0 | 380 | 120 | 295 | 215 | 243 |
| 2008 | 9 | 660 | 320 | 120 | 240 | 160 | 209 |
| 2008 | 10 | 1155 | 260 | 30 | 205 | 85 | 164 |
| 2008 | 11 | 90 | 200 | 10 | 150 | 60 | 107 |
| 2008 | 12 | 528 | 190 | 10 | 135 | 35 | 91 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 2009

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 2009 | 1 | 1021 | 150 | -20 | 140 | 25 | 85 |
| 2009 | 2 | 376 | 190 | 30 | 140 | 75 | 111 |
| 2009 | 3 | 284 | 260 | 40 | 195 | 85 | 148 |
| 2009 | 4 | 311 | 270 | 50 | 210 | 100 | 138 |
| 2009 | 5 | 106 | 340 | 70 | 260 | 155 | 193 |
| 2009 | 6 | 60 | 390 | 120 | 300 | 165 | 243 |
| 2009 | 7 | 0 | 390 | 130 | 295 | 220 | 253 |
| 2009 | 8 | 4 | 380 | 140 | 300 | 215 | 265 |
| 2009 | 9 | 335 | 360 | 120 | 285 | 180 | 226 |
| 2009 | 10 | 212 | 320 | 110 | 260 | 150 | 209 |
| 2009 | 11 | 130 | 240 | 50 | 195 | 90 | 147 |
| 2009 | 12 | 3007 | 180 | -10 | 160 | 50 | 115 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 2010

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 2010 | 1 | 1322 | 170 | 0 | 145 | 40 | 104 |
| 2010 | 2 | 2348 | 200 | 20 | 155 | 60 | 115 |
| 2010 | 3 | 934 | 210 | 30 | 170 | 85 | 125 |
| 2010 | 4 | 1636 | 280 | 50 | 225 | 110 | 165 |
| 2010 | 5 | 161 | 360 | 70 | 275 | 130 | 181 |
| 2010 | 6 | 180 | 370 | 110 | 280 | 155 | 222 |
| 2010 | 7 | 0 | 400 | 130 | 310 | 230 | 275 |
| 2010 | 8 | 248 | 410 | 160 | 330 | 220 | 278 |
| 2010 | 9 | 42 | 370 | 120 | 282 | 180 | 232 |
| 2010 | 10 | 804 | 270 | 100 | 200 | 135 | 178 |
| 2010 | 11 | 768 | 250 | 30 | 200 | 70 | 126 |
| 2010 | 12 | 2960 | 220 | 20 | 185 | 60 | 110 |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

Año 2011

| AÑO | MES | PRECIP. | T_MAX | T_MIN | TM_MAX | TM_MIN | TM_MES |
|------|-----|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 2011 | 1 | 461 | 170 | 20 | 150 | 55 | 105 |
| 2011 | 2 | 538 | 230 | 0 | 175 | 60 | 116 |
| 2011 | 3 | 1332 | 260 | 30 | 195 | 85 | 129 |
| 2011 | 4 | 1324 | 300 | 70 | 225 | 130 | 180 |
| 2011 | 5 | 900 | 315 | 110 | 250 | 165 | 207 |
| 2011 | 6 | 69 | 380 | 100 | 290 | 170 | 236 |
| 2011 | 7 | 0 | 380 | 130 | 295 | 200 | 249 |
| 2011 | 8 | 100 | 390 | 130 | 305 | 210 | 253 |
| 2011 | 9 | 168 | 370 | 120 | 285 | 185 | 236 |
| 2011 | 10 | 583 | 340 | 100 | 265 | 155 | 217 |
| 2011 | 11 | 1310 | - | - | - | - | - |
| 2011 | 12 | 52 | - | - | - | - | - |

Tabla 3.1. Datos Meteorológicos (Instituto Nacional de Meteorología; PROCLI)
(Continuación).

| Estación: Alosno (Tharsis-mina) | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Nº de años de la serie de datos: 32 | | | | | | | | | | | | |
| Precipitación media anual: 645,7 mm | | | | | | | | | | | | |
| Temperatura media anual: 17,2 °C | | | | | | | | | | | | |
| T media anual de las máximas diarias: 21,9 °C | | | | | | | | | | | | |
| T media anual de las mínimas diarias: 12,6 °C | | | | | | | | | | | | |
| T máxima absoluta: 45,0 °C | | | | | | | | | | | | |
| T mínima absoluta: -5,0 °C | | | | | | | | | | | | |
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sept | Oct | Nov | Dic |
| P (mm) | 70,9 | 57,6 | 49,9 | 69,8 | 39,7 | 10,5 | 2,6 | 6,3 | 34,7 | 87,5 | 99,6 | 116,8 |
| Tm (°C) | 9,7 | 10,9 | 13,7 | 14,4 | 18,1 | 22,7 | 25,8 | 25,6 | 22,9 | 18,4 | 13,6 | 10,7 |
| Tm max | 13,8 | 14,3 | 18,1 | 20,1 | 24,2 | 27,6 | 31,0 | 30,4 | 27,9 | 22,4 | 18,2 | 14,8 |
| Tm min | 5,2 | 6,8 | 9,1 | 10,2 | 13,0 | 18,0 | 20,8 | 20,9 | 17,9 | 13,8 | 9,1 | 6,6 |
| T max | 23,0 | 25,0 | 30,0 | 33,0 | 39,0 | 42,0 | 44,0 | 45,0 | 42,0 | 35,0 | 29,0 | 27,0 |
| T min | -5,0 | -2,0 | -2,0 | 2,0 | 4,0 | 1,0 | 10,0 | 11,0 | 7,0 | 3,0 | 0,0 | -2,0 |
| Siendo P la precipitación y T la temperatura | | | | | | | | | | | | |

Tabla 3.2. Resumen de parámetros meteorológicos referidos a 32 años (1980-2011).

3.3. CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA

El clima de una región viene determinado por una combinación de distintas variables meteorológicas, siendo la temperatura y la precipitación los parámetros principales (Elías y Castellvi, 1996).

Existe gran diversidad en clasificaciones climáticas. En general, todas se basan en los fundamentos similitud genésica o analogía entre algún elemento del clima. Lo ideal es una clasificación que mantenga las ventajas de uno y de otro grupo es decir, que se base en los conocimientos de la meteorología y que sirva de apoyo a la fitogeografía (Gandullo, 1997), así como al estudio de los procesos de contaminación.

3.3.1. Índices climáticos

Los índices climáticos son relaciones entre los distintos elementos del clima que pretenden cuantificar la influencia de éste sobre las comunidades vegetales (Gandullo, 1997). Generalmente se trata de una serie de índices de aridez, como parámetro que determina el crecimiento y desarrollo de la vegetación y los cultivos (Elías y Castellvi, 1996). Estos índices también son una importante información para el conocimiento de las posibles afecciones del clima sobre los procesos contaminantes mineros.

3.3.1.1. Índices de aridez

3.3.1.1.1. Índice de Lang

Se expresa como:

$$IL = P/T$$

Siendo:

P: Precipitación media anual expresada en mm.

T: Temperatura media anual en °C.

En función del valor de este índice termopluiométrico pueden determinarse seis zonas climáticas distintas que se muestran en la Tabla 3.3:

| Índice termopluiométrico | Zonas Climáticas |
|--------------------------|--------------------------------------|
| $0 < I_L < 20$ | Desierto |
| $20 < I_L < 40$ | Zona árida |
| $40 < I_L < 60$ | Zona húmeda de estepa y sabana |
| $60 < I_L < 100$ | Zona húmeda de bosques ralos |
| $100 < I_L < 160$ | Zona húmeda de bosques densos |
| $I_L < 160$ | Zona hiperhúmeda de prados y tundras |

Tabla 3.3. Zonas climáticas correspondientes al Índice de Lang.

En el caso estudiado, IL es igual a 37,50 que se corresponde con una zona climática de Lang árida.

3.3.1.1.2. Índice termopluviométrico de Dantin-Revenga

Se calcula del siguiente modo:

$$\text{IDR} = 100 \text{ T/P}$$

Siendo:

P: Precipitación media anual expresada en mm.

T: Temperatura media anual en °C.

Este índice toma un valor de 2,7 a partir de los datos de nuestra estación, lo que se corresponde con una zona semiárida.

En la Tabla 3.4 se resumen las zonas climáticas correspondientes con este índice.

| Índice termopluviométrico | Zonas Climáticas |
|---------------------------|-------------------|
| 0 – 2 | Zona húmeda |
| 2 – 3 | Zona semiárida |
| 3 – 6 | Zona árida |
| < 6 | Zona subdesértica |

Tabla 3.4. Zonas climáticas correspondientes al índice termopluviométrico de Dantin-Revenga.

3.3.1.2. Índice de Vernet

$$I = \pm 100 (H-h)/PA \times Mv/Pv$$

Siendo:

H: Precipitación de la estación más lluviosa (mm).

h: Precipitación de la estación más seca (mm).

PA: Precipitación anual (mm).

Pv: Precipitación estival (jun+jul+ago) (mm).

Mv: Media de las máximas estivales (°C).

Este índice será negativo cuando el verano sea el primero o segundo de los mínimos pluviométricos.

En la Tabla 3.5 se resumen los tipos de clima en función del Índice de Vernet.

En este caso, el Índice de Vernet alcanza un valor de -53,50 por lo que el clima se enmarca dentro del tipo mediterráneo.

| Valores de I | Tipo de Clima |
|---------------|-----------------------|
| $I > +2$ | Continental |
| $0 < I < +2$ | Oceánico-continental |
| $-1 < I < 0$ | Oceánico |
| $-2 < I < -1$ | Pseudoceánico |
| $-3 < I < -2$ | Oceánico-mediterráneo |
| $-4 < I < -3$ | Submediterráneo |
| $I < -4$ | Mediterráneo |

Tabla 3.5. Tipos de clima en función del Índice de Vernet

3.3.2. Climodiagrama de Walter y Lieth

H. Gaussen estableció en 1952 el siguiente criterio: un mes puede considerarse seco cuando la precipitación, expresada en mm, es inferior al doble de la temperatura expresada en °C. Basado en esto, propugnó, para la definición del clima de una estación, la elaboración de lo que él denominó diagrama ombrotérmico, llevando en el eje de abscisas los tiempos medidos en meses, y en ordenadas, tanto las precipitaciones mensuales como las temperaturas medias, empleando éstas una escala doble que las primeras.

Más tarde, H. Walter y H. Lieth, se acogieron a éste mismo criterio para estudiar el clima de una zona y propugnaron la construcción de un diagrama en el que, además, se adjuntan una serie de datos complementarios (Gandullo, 1997): altitud, número de años observados, temperatura media anual, precipitación anual, media de las mínimas del mes más frío, mínima absoluta, media de las máximas del mes más cálido, máxima absoluta, temperaturas medias mensuales, precipitaciones mensuales, áreas secas y áreas húmedas.

En la Figura 3.1 se puede observar el climograma de Walter-Lieth obtenido para los datos de la estación meteorológica Alosno (Tharsis-mina). En este gráfico se representan las temperaturas medias y las precipitaciones mensuales, indicándose

mediante colores azules las áreas húmedas y con color rojo las áreas secas. Además, se indica:

Altitud: 286 metros.

Número de años observados: 32.

Temperatura media anual: 17,2 °C.

Precipitación anual: 645,7 mm.

Media de las mínimas del mes más frío: 5,2 °C.

Mínima absoluta: -5 °C.

Media de las máximas del mes más cálido: 31,0 °C.

Máxima absoluta: 45°C.

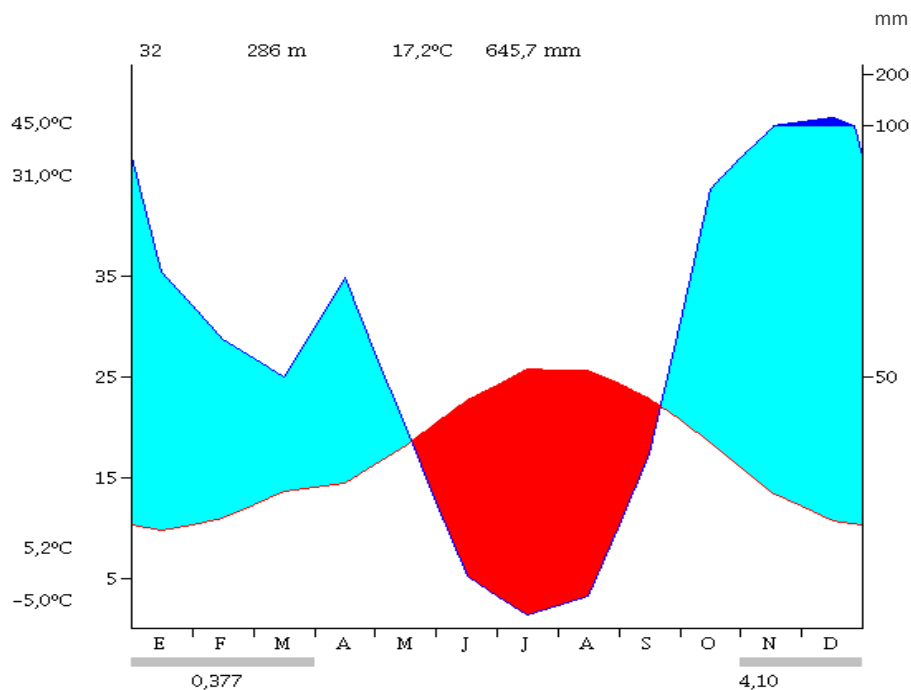


Figura 3.1. Climodiagrama de Walter y Lieth.

De este gráfico se puede deducir que en la zona de estudio existe un intervalo de sequía de 4,10 meses, que abarca desde los meses de mayo a septiembre, con una intensidad de la sequedad de 0,377, siendo ésta el cociente de dividir el área seca entre el área húmeda. No existe así mismo intervalo de helada segura, esto es el número de meses en los que la media de las mínimas es menor a cero, existiendo un intervalo de helada probable desde diciembre hasta marzo (ambos inclusive), referido este intervalo a los meses en que la media de las mínimas es superior a 0 °C pero la mínima absoluta se mantiene inferior a 0 °C.

3.3.3. Clasificación climática de Thornthwaite

3.3.3.1. Balance hídrico

En 1948, Thornthwaite introduce el concepto de evapotranspiración potencial (ETP) o pérdidas por evapotranspiración, en el doble supuesto de un desarrollo vegetal óptimo y una capacidad de campo permanentemente completa (Custodio, 1976).

Para el cálculo de la ETP mensual este autor propuso la siguiente fórmula:

$$ETP = 16 F_j (10T_m/I)^a$$

Donde:

F_j: Duración media de la luz solar por comparación a un mes de 30 días y 12 horas de luz.

I: Índice de calor anual = $\sum(T_m/e)1,514$

a = $0,000000675 I^3 - 0,0000771 I + 0,49239$

T_m: temperatura media mensual (°C)

En la Tabla 3.6 se muestra la ETP calculada mediante el método de Thornthwaite.

| MESES | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| ETP | 18,5 | 22,6 | 41,5 | 48,8 | 82,1 | 123,1 | 158,0 | 147,0 | 106,1 | 66,9 | 33,7 | 21,6 |

Tabla 3.6. Valores de ETP calculada por Thornthwaite.

Con estos valores y con los de la temperatura media mensual (T_m), precipitación mensual (P), coeficiente de escorrentía directa % (C_e), reserva de agua del suelo (Res) y evapotranspiración real (ETR), se puede establecer un balance hídrico mediante el que se obtiene el déficit de humedad D y el excedente de humedad S, siendo:

$$D = ETR - ETP$$

$$S = P - ETP$$

Se ha calculado el balance hídrico, para la serie de 32 años estudiada, y para una capacidad de campo de 100 mm (Tabla 3.7) y para una capacidad de campo de 150

mm (Tabla 3.8), representándose los valores obtenidos en un diagrama (figuras 3.2 y 3.3), en los que se muestran los valores mensuales de P, ETP y ETR.

De estos diagramas cabe destacar:

Capacidad de campo de 100 mm (Figura 3.2):

- Existe un exceso de humedad desde finales de noviembre hasta la tercera semana de abril.
- Se produce déficit de humedad desde tercera semana de abril hasta mediados de septiembre, lo que produce un agotamiento de la reserva del suelo.
- La recarga de reserva del suelo se produce desde mediados de septiembre hasta la tercera semana de noviembre.

Capacidad de campo de 150 mm (Figura 3.3):

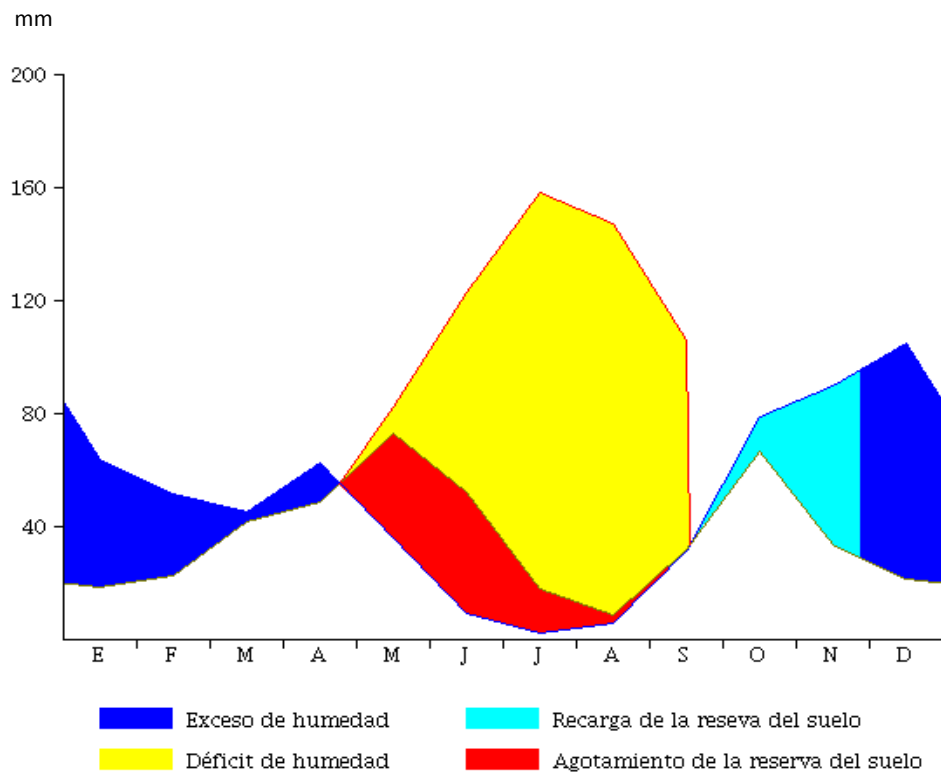
- Ocurre exceso de humedad igualmente desde mediados de diciembre hasta finales de abril.
- El periodo de déficit de humedad es de abril a mediados de septiembre y conlleva el agotamiento de las reservas del suelo.
- Desde mediados de septiembre comienza la recarga del suelo, que se mantiene hasta mediados de diciembre.

| Balance Hídrico | | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------------------------------|-------|------|-------------------------------------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| (ETP calculada por Thornthwaite) | | | | | | | | | | | | |
| Estación: ALOSNO (Tharsis-mina) | | | | | | | | | | | | |
| Capacidad de campo: 100,0 mm | | | | | | | | | | | | |
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sept | Oct | Nov | Dic |
| Tm | 9,7 | 10,9 | 13,7 | 14,4 | 18,1 | 22,7 | 25,8 | 25,6 | 22,9 | 18,4 | 13,6 | 10,7 |
| ETP | 18,5 | 22,6 | 41,5 | 48,8 | 82,1 | 123,1 | 158,0 | 147,0 | 106,1 | 66,9 | 33,7 | 21,6 |
| Pe | 63,8 | 51,8 | 44,9 | 62,8 | 35,7 | 9,5 | 2,3 | 5,7 | 31,3 | 78,7 | 89,6 | 105,1 |
| Res | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 62,9 | 20,2 | 4,3 | 1,0 | 0,5 | 12,3 | 68,2 | 100,0 |
| ETR | 18,5 | 22,6 | 41,5 | 48,8 | 72,8 | 52,2 | 18,3 | 8,0 | 31,8 | 66,9 | 33,7 | 21,6 |
| S | 45,3 | 29,2 | 3,4 | 14 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 51,7 |
| D | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 9,3 | 70,9 | 139,7 | 138,1 | 74,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| $\Sigma ETP = 869,8 \text{ mm}$ | | | $\Sigma ETR = 437 \text{ mm}$ | | | | | | | | | |
| $\Sigma S = 143,6 \text{ mm}$ | | | $\Sigma D = 432,3 \text{ mm}$ | | | | | | | | | |
| Tm: Temperatura media mensual (°C) | | | | | | Res: Reserva de agua del suelo (mm) | | | | | | |
| ETP: Evapotranspiración Potencial (mm) | | | | | | ETR: Evapotranspiración real (mm) | | | | | | |
| Pe: Precipitación efectiva (mm) | | | | | | D: Déficit de agua (mm) | | | | | | |
| S: Exceso de agua (mm) | | | | | | | | | | | | |

Tabla 3.7. Balance hídrico para una capacidad de campo de 100 mm.

| Balance Hídrico | | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------------------------|-------|-------|-------------------------------------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| (ETP calculada por Thornthwaite) | | | | | | | | | | | | |
| Estación: ALOSNO (Tharsis-mina) | | | | | | | | | | | | |
| Capacidad de campo: 150,0 mm | | | | | | | | | | | | |
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sept | Oct | Nov | Dic |
| Tm | 9,7 | 10,9 | 13,7 | 14,4 | 18,1 | 22,7 | 25,8 | 25,6 | 22,9 | 18,4 | 13,6 | 10,7 |
| ETP | 18,5 | 22,6 | 41,5 | 48,8 | 82,1 | 123,1 | 158,0 | 147,0 | 106,1 | 66,9 | 33,7 | 21,6 |
| Pe | 63,8 | 51,8 | 44,9 | 62,8 | 35,7 | 9,5 | 2,3 | 5,7 | 31,3 | 78,7 | 89,6 | 105,1 |
| Res | 150,0 | 150,0 | 150,0 | 150,0 | 110,1 | 51,6 | 18,3 | 7,1 | 4,3 | 16,1 | 72,1 | 150,0 |
| ETR | 18,5 | 22,6 | 41,5 | 48,8 | 72,8 | 52,2 | 18,3 | 8,0 | 31,8 | 66,9 | 33,7 | 21,6 |
| S | 45,3 | 29,2 | 3,4 | 14 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 5,5 |
| D | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,5 | 55,1 | 122,3 | 130,2 | 72,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Σ ETP = 869,8 mm | | | Σ ETR = 483,8 mm | | | | | | | | | |
| Σ S = 97,4 mm | | | Σ D = 202,2 mm | | | | | | | | | |
| Tm: Temperatura media mensual (°C) | | | | | | Res: Reserva de agua del suelo (mm) | | | | | | |
| ETP: Evapotranspiración Potencial (mm) | | | | | | ETR: Evapotranspiración real (mm) | | | | | | |
| Pe: Precipitación efectiva (mm) | | | | | | D: Déficit de agua (mm) | | | | | | |
| S: Exceso de agua (mm) | | | | | | | | | | | | |

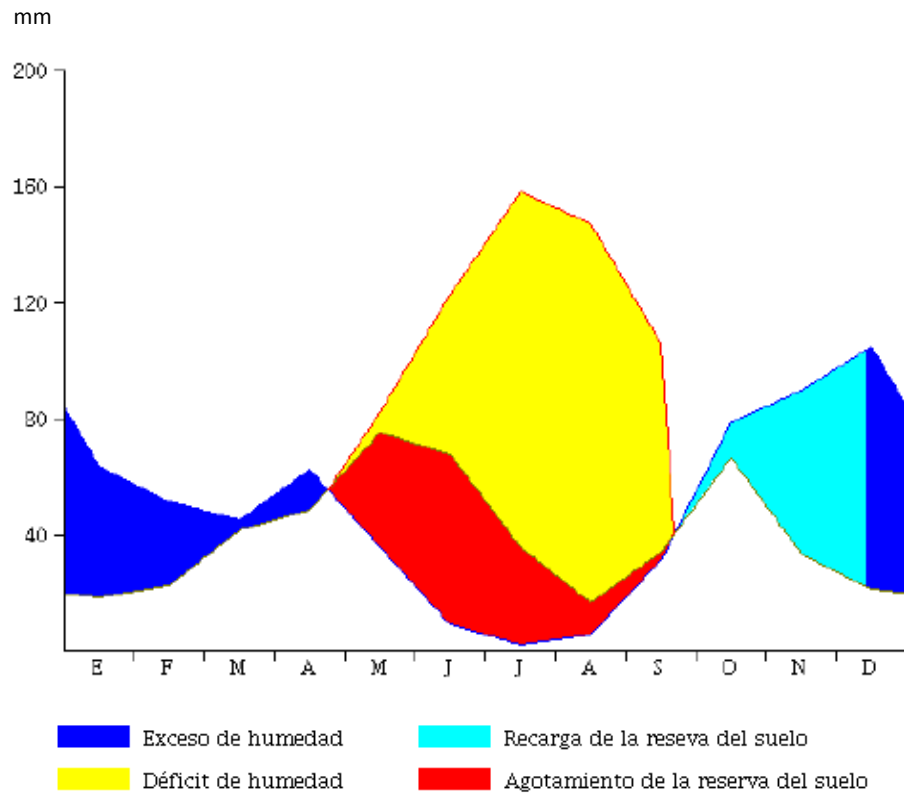
Tabla 3.8. Balance hídrico para una capacidad de campo de 150 mm.



Índice de humedad: -33,2 (clima seco subhúmedo C1)

Índice de eficacia térmica: 869,8 (clima mesotérmico B'3)

Figura 3.2. Diagrama de balance hídrico para una capacidad de campo de 100 m.



Índice de humedad: -33,2 (clima seco subhúmedo C1)

Índice de eficacia térmica: 869,8 (clima mesotérmico B'3)

Figura 3.3. Diagrama de balance hídrico para una capacidad de campo de 150 mm.

3.3.3.2. Índice de humedad

La humedad o aridez de un clima se expresa en base al índice de exceso de agua (I_h) y al índice de aridez (I_a):

$$I_h = (S/ETP) \times 100$$

$$I_a = (D/ETP) \times 100$$

Siendo:

D: Déficit de humedad (mm)

S: Exceso de humedad (mm)

Puesto que el exceso de humedad y la falta de agua se presentan generalmente en estaciones distintas, ambos deberán entrar en un índice de humedad afectado

positivamente el primero y negativamente el segundo. El índice de humedad considerado por Thornthwhite es:

$$I_m = I_h - I_a = [(100 \times S) - (100 \times D)] / ETP$$

En la Tabla 3.9 se muestran los resúmenes de los tipos climáticos y sus límites en función del índice de humedad:

| Índice de humedad | Tipo de clima |
|-------------------|-------------------------------|
| > 100 | Perhúmedo A |
| 80 – 100 | Húmedo B ₄ |
| 60 – 80 | Húmedo B ₃ |
| 40 – 60 | Húmedo B ₂ |
| 20 – 40 | Húmedo B ₁ |
| 0 – 20 | Subhúmedo C ₂ |
| (-33.3) – 0 | Seco subhúmedo C ₁ |
| (-66.0) - (-33.3) | Semiárido D |
| (-100) – (-66.0) | Árido E |

Tabla 3.9. Tipos climáticos e índices de humedad

En nuestro caso, para una capacidad de campo de 100 mm, los valores calculados son:

$$D = 432,3 \text{ mm} \quad I_a = 49,69 \text{ mm}$$

$$S = 143,6 \text{ mm} \quad I_h = 16,5 \text{ mm}$$

$$ETP = 869,8 \text{ mm} \quad I_m = -33,2 \text{ mm}$$

Y para la capacidad de campo de 150 mm, los valores calculados son:

$$D = 386,1 \text{ mm} \quad I_a = 23,24 \text{ mm}$$

$$S = 97,4 \quad I_h = 11,19 \text{ mm}$$

$$ETP = 869,8 \quad I_m = -12,05 \text{ mm}$$

Con estos datos, el clima de la zona de estudio es seco subhúmedo C1.

Variación estacional de la humedad efectiva

Los índices de exceso de agua y aridez permiten caracterizar la variación estacional de la humedad de un clima y así establecer nuevas subdivisiones.

Para climas húmedos (A, B y C2):

| | |
|------------------------|--|
| $0 < I_a \leq 16,7$ | Poca o ninguna falta de agua r |
| $16,7 < I_a \leq 33,3$ | Falta moderada de agua en verano s |
| $16,7 < I_a \leq 33,3$ | Falta moderada de agua en invierno w |
| $I_a > 33,3$ | Falta intensa de agua en verano s ₂ |

Por lo tanto, nos encontramos ante un clima con falta intensa de agua en verano S2.

Para climas secos (C1, D y E):

| | |
|--------------------|--|
| $0 < I_h \leq 10$ | Pequeño o ningún exceso de agua d |
| $10 < I_h \leq 20$ | Exceso moderado de agua en invierno s |
| $10 < I_h \leq 20$ | Exceso moderado de agua en verano w |
| $I_h > 20$ | Gran exceso de agua en invierno s ₂ |
| $I_h > 20$ | Gran exceso de agua en verano w ₂ |

Por tanto, se trata de un clima con exceso moderado de agua en invierno s.

3.3.3.3. Índice de eficacia térmica

En función del valor de ETP, Thornthwaite establece una clasificación relacionada con la eficacia térmica. Los tipos climáticos en base a este índice se pueden observar en la Tabla 3.10.

| Índice de eficacia térmica ETP anual (mm) | Sigla | Tipo climático |
|--|-------|----------------------|
| < 142 | E' | Glacial |
| 142 - 285 | D' | Tundra |
| 285 - 427 | C'1 | Primer microtérnico |
| 427 - 570 | C'2 | Segundo microtérnico |
| 570 - 712 | B'1 | Primer mesotérnico |
| 712 - 855 | B'2 | Segundo mesotérnico |
| 855 - 997 | B'3 | Tercer mesotérnico |
| 997 - 1140 | B'4 | Cuarto mesotérnico |
| > 1140 | A' | Megatérnico |

Tabla 3.10. Tipos climáticos en base a la eficacia térmica.

En el caso de la estación de estudio Alosno (Tharsis-mina), con un valor de ETP de 869,8 mm, nos encontramos en el tercer mesotérnico (B'3).

CAPITULO 4

MATERIALES Y METODOS

4. MATERIALES Y METODOS

En el presente capítulo se describen los materiales y métodos empleados en la investigación. El contenido se ha estructurado en diferentes apartados que tienen como fin común la adquisición de datos que han permitido cumplir los objetivos de la Tesis Doctoral.

Tras definirse los objetivos central y específicos, se realizó una exhaustiva revisión de antecedentes, tanto de los procesos relacionados con el drenaje ácido de mina, como de las técnicas y métodos de adquisición y tratamiento de datos, procediéndose a la actualización de las cartografías existentes con el fin de delimitar la zona de estudio. A continuación, se diseñó la red de muestreo.

Tras la fase de muestreo y el análisis de las muestras recolectadas se llevó a cabo un tratamiento de los datos obtenidos, generando en primer lugar las bases de datos empleadas en esta Tesis Doctoral, a las que se añadieron otros parámetros externos, como las precipitaciones, que guardan estrecha relación con el comportamiento de los elementos estudiados, y por tanto, con los procesos de origen geoquímico que concurren en los embalses objeto de la investigación.

4.1. DISEÑO DE LA RED Y PLAN DE MUESTREO

La toma de muestras se desarrolló en dos etapas, que comprenden los años hidrológicos 2011/2012 (1ª campaña de muestreo) y 2012/2013 (2ª campaña de muestreo), desde los meses de Octubre a Mayo, coincidiendo con el período de lluvias en estas latitudes y, en consecuencia, con el periodo del año en el que fluye el agua por la mayor parte de la red fluvial.

Una vez delimitada la zona de estudio y conocidas las relaciones hídricas, referidas tanto a cauces naturales como a aportes de lixiviados mineros, se procedió a determinar los puntos en los que se tomarían las muestras de agua y sedimentos en los embalses durante todo el año hidrológico de la primera campaña de muestreo. Los embalses fueron seleccionados en base a su afección por AMD. Durante esta primera etapa se llevó a cabo el estudio de un medio generador tipo.

Una vez caracterizadas las aguas de todos los embalses muestreados en esta primera etapa, para el segundo año hidrológico, fue seleccionado para su muestreo un embalse tipo donde se llevo a cabo la toma de agua en los puntos definidos.

Igualmente, se definieron para este embalse dos puntos para la instalación de dos sondas multiparamétricas, para medir en registro continuo.

A continuación se explican de manera más detallada los diferentes muestreos realizados en ambas campañas.

4.1.1. Primera campaña de muestreo (2011/2012)

4.1.1.1. Muestreo quincenal de agua en embalses

En la primera campaña (2011/2012) se muestrearon bimensualmente todos los embalses seleccionados (Figura 4.1). Para ello se definieron dos puntos de muestreo para cada embalse (Tabla 4.1), uno de ellos aguas arriba inmediatamente por encima del límite de crecida máximo de la presa denominado como “punto cauce”, y un segundo punto aguas abajo del anterior que quede cubierto por las aguas en época de medida denominado como “punto cola” (Figura 4.2).

En ambos puntos, se tomaron muestras de agua para la determinación de los parámetros físicos y el análisis químico de metales y sulfatos.

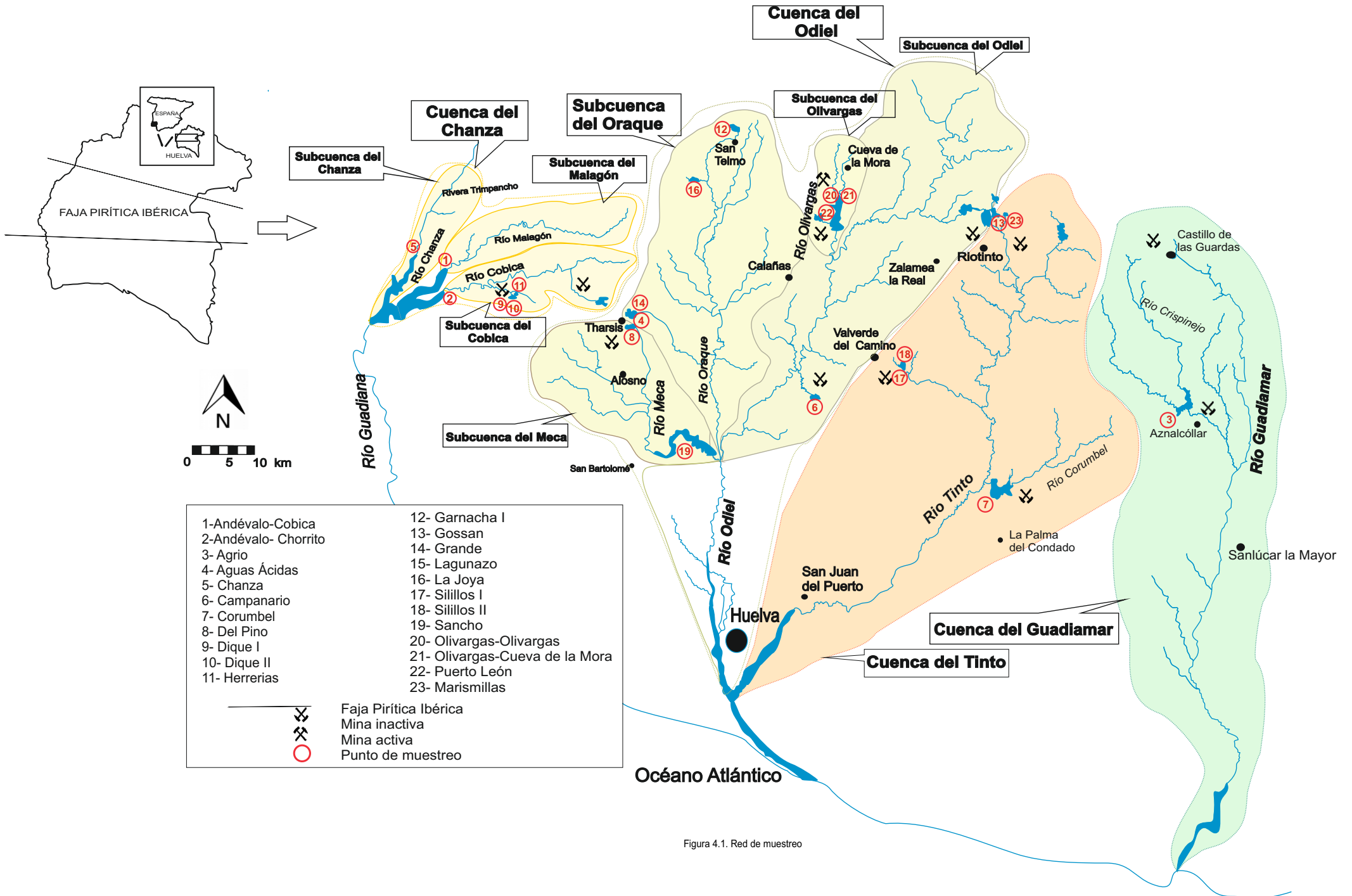


Figura 4.1. Red de muestreo

| Embalses | COORDENADAS UTM 29 | | COORDENADAS UTM 29 | |
|-------------------|--------------------|---------|--------------------|---------|
| | Punto cauce | | Punto cola | |
| | X | Y | X | Y |
| Andévalo-Cobica | 653169 | 4167593 | 650803 | 4167417 |
| Andévalo-Chorrito | 649310 | 4165635 | 649240 | 4165762 |
| Agrio | 738795 | 4161112 | 738737 | 4161112 |
| Aguas Ácidas | 666987 | 4163532 | 666964 | 4163520 |
| Chanza | 642545 | 4167336 | 637578 | 4173754 |
| Campanario | 691702 | 4155973 | 691692 | 4155967 |
| Corumbel | 717508 | 4147811 | 717217 | 4147612 |
| Del Pino | 667845 | 4162503 | 6667841 | 4162493 |
| Dique I | 651759 | 4164516 | 651528 | 4164736 |
| Dique II | 651364 | 4165071 | 651387 | 4165068 |
| Herrerias | 651583 | 4165579 | 651471 | 4165235 |
| Garnacha I | 678793 | 4186914 | 678806 | 4186885 |
| Grande | 666500 | 4163714 | 666764 | 4163634 |
| Lagunazo | 662925 | 4165635 | 662731 | 4165639 |
| La Joya | 673499 | 4180198 | 673647 | 4180222 |
| Marismillas | 715246 | 4175223 | 715238 | 4175219 |
| Sillillos I | 700396 | 4161791 | 700515 | 4162637 |
| Sillillos II | 700789 | 4161154 | 701078 | 4161423 |
| El Sancho | 672198 | 4147427 | 670111 | 4147929 |
| Olivargas | 692447 | 4182533 | 692476 | 4182511 |
| Cueva de la Mora | 693688 | 4180529 | 693586 | 4180337 |
| Puerto León | 689860 | 4176879 | 689958 | 4176833 |
| Gossan | - | - | 712690 | 4179052 |

Tabla 4.1. Coordenadas de los puntos de muestreo de aguas en cada embalse.

Algunas consideraciones a tener en cuenta en los puntos de muestreo son:

- En la presa del Andévalo se han seleccionado dos puntos de muestreo, uno correspondiente a la confluencia con el Arroyo Cobica, y otro con el Arroyo Chorrito, a los que se les ha denominado, respectivamente, “Andévalo-Chorrito” y “Andévalo-Cobica”
- En el embalse Olivargas se han establecido dos puntos de medida, uno de ellos justo en la confluencia del río Olivargas con el embalse Olivargas, al que se le ha denominado en el presente estudio como “embalse Olivargas”, y otro punto, en la confluencia del Barranco de la Malena con el mismo embalse, al que se le ha denominado como “embalse Cueva de la Mora”.
- El embalse de Gossan es una presa de residuos mineros construida para el depósito de efluentes procedentes del tratamiento mineralúrgico de la planta de Riotinto. El punto en el que se muestrea este embalse es considerado como “punto cola”. El

“punto cauce” no ha podido ser muestreado debido a que la planta de tratamiento se encuentra actualmente inactiva.

- El embalse Grande recibe aportes de unas escombreras pertenecientes al complejo minero de Tharsis, situadas en uno de sus márgenes. Para la recogida de los lixiviados ácidos de las escombreras existe una regola perimetral que los conducen hasta una pequeña presa artificial a la que se ha denominado “Aguas Ácidas” por no tener ningún nombre conocido, y que ha sido muestreada. Para el “punto cauce” se han considerado los lixiviados que fluían desde la escombrera a la balsa, mientras que para el “punto cola” se consideró el punto de entrada de estas aguas ácidas a la presa.

- En el embalse Herrerías existen dos diques artificiales que produjeron la subdivisión de éste en tres: el propio embalse Herrerías, como se conoce al conjunto completo, y los embalses Dique I de Pedrianes y Dique II de En Medio. Todos ellos han sido muestreados.

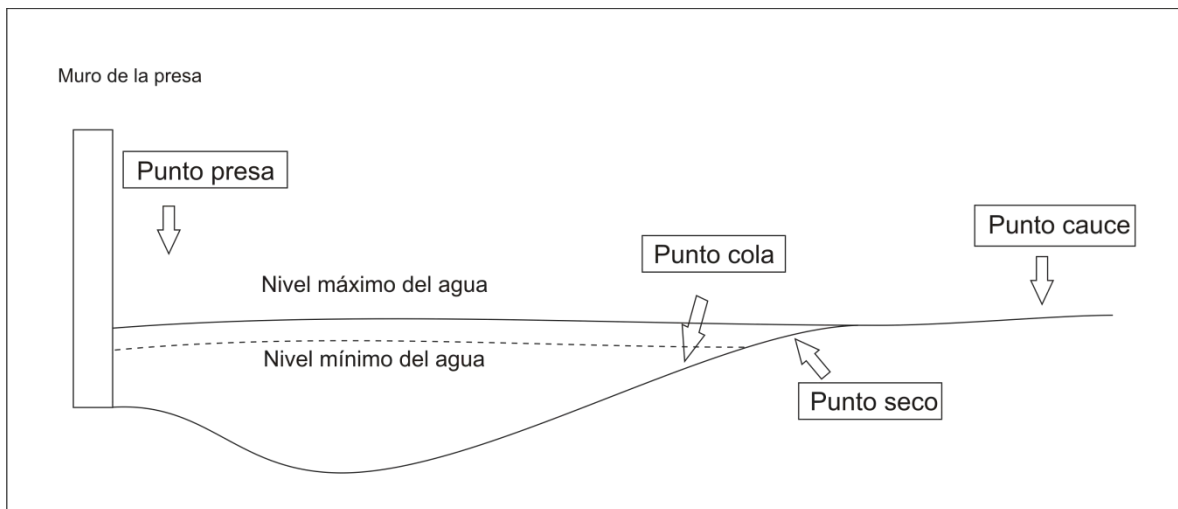


Figura 4.2. Localización de los puntos de muestreo.

4.1.1.2. Muestreo puntual de agua en profundidad en el embalse El Sancho

De manera puntual, en Octubre de 2011, se ha realizado un muestreo estratificado de agua a pie de muro del embalse El Sancho, desde la superficie con intervalos de 1 metro de profundidad hasta el fondo de la presa. A este punto localizado en la presa del embalse se le ha denominado “punto presa” (coordenadas UTM 29: 678210, 4147777) (Figura 4.2).

4.1.1.3. Muestreo de sedimentos en el embalse Marismillas

Localizado entre el “puntos cauce” y el “punto cola” de los embalses, se ha ubicado un tercer punto que ha permitido, con el nivel del agua en su cota mínima, obtener datos de contrastación geoquímicas mediante muestreo directo, al que se denomina “punto seco” (Figura 4.2).

En Noviembre de 2011 se realizó una campaña de muestreo de sedimentos en el denominado “punto seco” del embalse Marismillas (coordenadas UTM 29: 715228, 4175208). En la actualidad, este embalse se encuentra colmatado, tal como se describe en el capítulo de Introducción.



Fotografía 4.1. Campaña de sondeos con recuperación de testigo realizada en el embalse Marismillas en Noviembre de 2011.

4.1.1.4. Muestreo puntual de agua en mina Poderosa

Como medio generador representativo para su caracterización, ha sido elegida la mina Poderosa (Figura 4.3), localizada 7 Km al NW del grupo minero de Riotinto (SO España).

El cauce objeto de estudio tiene una longitud de 600 metros aproximadamente. Nace en un túnel abierto en esta mina (Fotografía 4.2), que comunicaba inicialmente, mediante ferrocarril, las labores de interior con la vertiente norte de la montaña en explotación. Este túnel permite la salida al exterior de las aguas que han sufrido procesos AMD en el interior de las cortas y galerías que se encuentran intercomunicadas desde una edad no inferior a 2000 años b.p. (Pinedo, 1963). Mediante técnicas de laboreo se combinaron cámaras y pilares con las cortas a cielo abierto hasta profundidades superiores a 250 metros, conformando una considerable explotación, que solo en el periodo comprendido entre 1864 y 1924 permitió la extracción de más de 600.000 toneladas de mineral de cobre, tratado *in situ* mediante técnicas de canaleo. El cauce en estudio desemboca a 600 metros aguas abajo en el río Odiel.

La característica, a simple vista, más llamativa de este cauce es el cambio de color que sufren sus aguas. Inicialmente salen del túnel prácticamente transparentes sin color alguno, y a medida que descienden, alejándose del punto de surgencia van adquiriendo colores cada vez mas rojizos y característicos de cauces sometidos a procesos AMD.

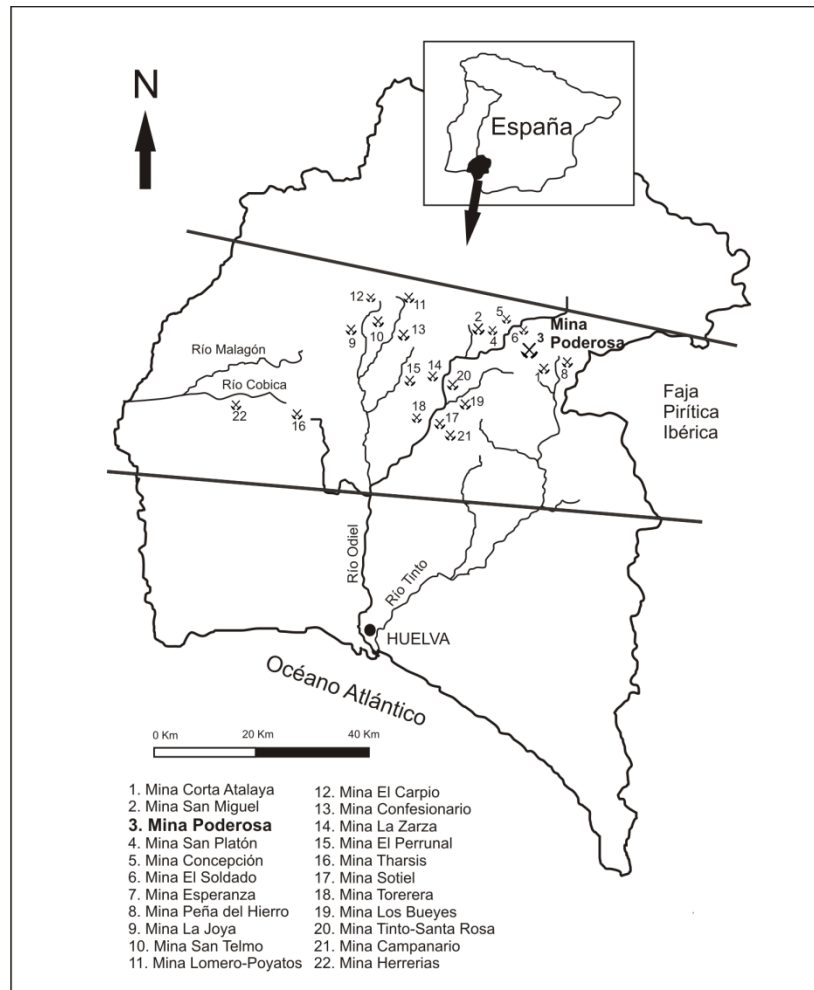


Figura 4.3. Mapa de localización de mina Poderosa.



Fotografía 4.2. Túnel localizado en mina Poderosa.

Al final de la estación lluviosa de la primera campaña de muestreo (Mayo 2012), y tras un breve periodo de precipitaciones, cuando el túnel aportaba un caudal próximo a 10 L/s, se procedió, de manera puntual, al muestreo de agua a lo largo del cauce desde

su nacimiento (P1) hasta su desembocadura en el río Odiel (P16), resultando un total de 16 puntos, espaciados una distancia aproximada de 10 metros entre cada dos estaciones de medida. Se muestrearon igualmente dos puntos correspondientes a la entrada de dos afluentes al cauce estudiado (punto 8, correspondiente a un primer afluente con aguas procedentes de las instalaciones industriales de la mina, y punto 15, ubicado en un afluente que transporta aguas de otras instalaciones de rango menor ajenas a mina Poderosa, procedentes de la mina El Soldado, en las que las aguas muestran características claramente diferentes a las del cauce en estudio y con menor afección por AMD) (Figura 4.4).

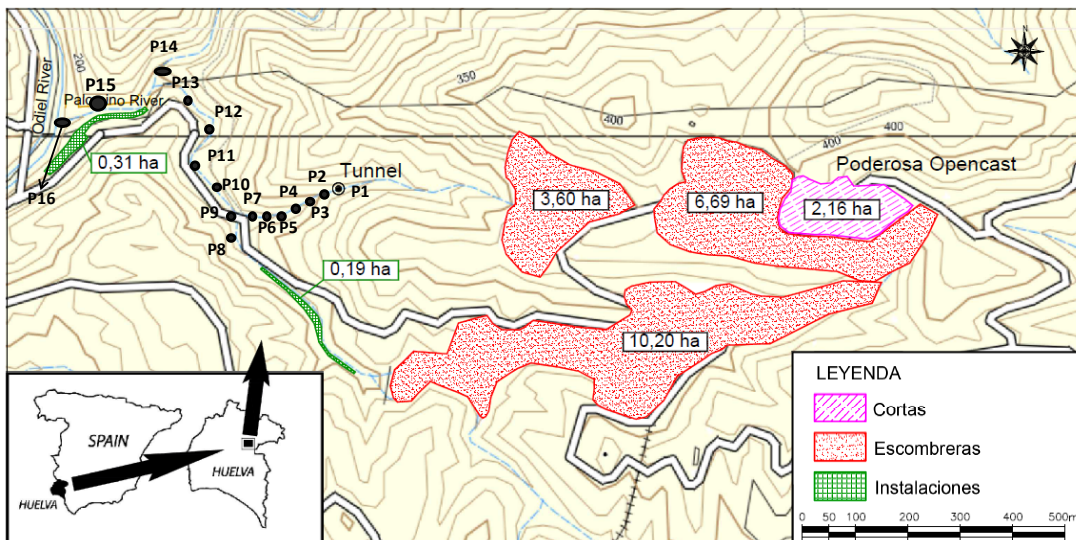


Figura 4.4. Localización de los puntos muestreados en mina Poderosa.

4.1.2. Segunda campaña de muestreo

4.1.2.1. Muestreo semanal de agua en el embalse El Sancho

En la segunda campaña de muestreo (2012/2013), se seleccionó el embalse El Sancho, como el más representativo entre todos los estudiados durante la primera etapa.

Se procedió, semanalmente, a la toma de muestras de agua en el punto cola y punto presa de este embalse, así como del cauce (punto cauce) del cual se nutre, la rivera Meca, lo que ha permitido el estudio de los parámetros físicos-químicos en los tres puntos citados.

4.1.2.2. Toma de datos físico-químicos mediante sondas multiparamétricas instaladas en el embalse El Sancho

Para un estudio en mayor profundidad de las relaciones hidroquímicas y los procesos típicos de AMD, se procedió a la monitorización semanal del embalse El Sancho, tanto del punto cola, como del punto presa, así como del punto cauce.

Para ello, se instalaron en el cauce y en la presa (Figura 4.5) dos sondas multiparamétricas, ambas de la casa comercial Hydrolab, modelo Minisonde y MS5. Éstas fueron programadas para medir temperatura (T^a), pH, conductividad y total de sólidos disueltos (TSD) cada 30 minutos, de manera simultánea en los dos puntos de muestreo definidos.

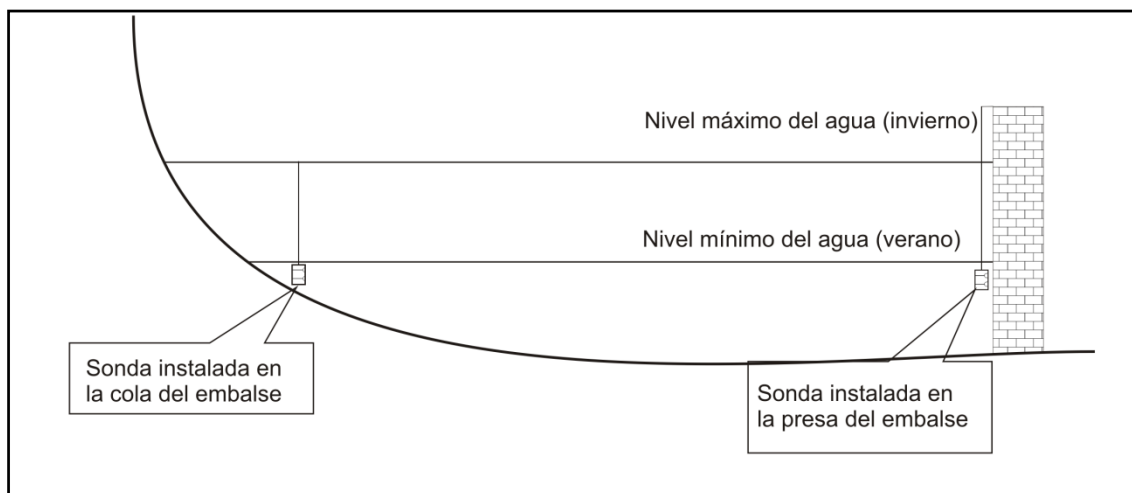


Figura 4.5. Esquema representativo de las sondas instaladas en la cola y en la presa del embalse El Sancho.

4.2. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS

4.2.1. Muestras de agua

4.2.1.1. Selección de parámetros

Como consecuencia de las características de los procesos AMD ya descritos en el capítulo de Introducción, son las muestras de agua las que conforman la parte sustancial del muestreo para la obtención de los resultados y conclusiones de esta Tesis Doctoral.

En las muestras recogidas se analizaron y estudiaron las relaciones existentes entre los siguientes parámetros:

- pH, conductividad, total de sólidos disueltos (TSD), oxígeno disuelto (OD) y potencial redox (EH), como indicadores de las características físicas y químicas de las aguas. Son de gran valor para dar una idea general de la afección que el drenaje ácido de mina produce en cada punto.
- Metales y metaloides, por tratarse de elementos de gran toxicidad a partir de ciertas concentraciones, que se encuentran asociados a la contaminación por AMD, ya que son los elementos que conforman la mayor parte de las formas minerales presentes en los sulfuros masivos de la Faja Pirítica Ibérica. Los elementos analizados fueron: Fe, Cu, Co, Ni, Cd, Pb, Zn, Mn, As, Sb, Al.
- Sulfatos, como uno de los principales productos generados en los procesos geoquímicos de tipo AMD. Se trata en estos casos del anión predominante, y su concentración puede ejercer gran influencia sobre las reacciones químicas que se generan.

4.2.1.2. Medidas *in situ*

En todas la muestras de agua tomadas en las diferentes campañas y puntos de muestreo ya descritos, se llevó a cabo la determinación *in situ* del pH, temperatura, conductividad y sólidos disueltos totales, mediante el uso de un equipo multiparamétrico portátil (CrisonMM40) (Fotografía 4.3).

Antes de su utilización, los electrodos se calibraron y testaron, de acuerdo con las instrucciones del fabricante.



Fotografía 4.3. Equipo multiparamétrico Crison MM40.

4.2.1.3. Muestreo en campo

En cada punto de muestreo se tomaron dos muestras de agua en botes de polietileno esterilizados, una para la determinación de sulfatos y otra para la determinación de metales pesados, a la que se añadió ácido nítrico hasta conseguir un $\text{pH} < 2$, a fin de evitar la precipitación de los metales durante el transporte hasta el laboratorio, que se efectuó en recipientes de P.V.C. de 100 mL y 200 mL, respectivamente, en un refrigerador portátil a 4°C .

Para el muestreo de agua en profundidad en la presa del embalse El Sancho se ha empleado una botella sacamuestras Hidro-bios KIEL, que ha permitido la extracción de las muestras representativas de cada una de las profundidades a intervalos de 1 metro desde la superficie hasta el fondo, obteniéndose un total de 28 muestras en la misma vertical.

Las sondas instaladas en los puntos definidos en el embalse El Sancho fueron revisadas semanalmente (limpieza de los sensores, calibración y cambio de baterías), momento en el que fueron volcados los datos a un ordenador para su posterior tratamiento (Fotografía 4.4).



Fotografía 4.4. Imagen de una de las sondas multiparamétricas empleadas durante el proceso de volcado de datos al ordenador.

4.2.1.4. Tratamiento de las muestras

En el laboratorio, las muestras de agua fueron filtradas con filtros de nitrato de celulosa de 0,45 micras (Sartorius 11406-47-ACN) con la ayuda de un quitasato de vidrio conectado a una bomba de vacío para acelerar el flujo (Fotografía 4.5).

El procedimiento consiste en colocar un filtro en la piedra porosa del quitasatos y echar la muestra en el vaso. La bomba de aire crea un vacío que acelera el flujo del agua a través del filtro, reteniendo las partículas de tamaño mayor a 0,45 micras. El agua se recoge en el matraz inferior, libre de partículas. Para cada muestra se empleaba un filtro, para evitar contaminaciones. Con el mismo fin, se procedía a limpiar el sistema filtrador entre cada muestra con agua destilada y ácido nítrico al 2% de concentración.

Las muestras de agua ya filtradas fueron almacenadas en botes de polietileno herméticamente cerrados en un frigorífico a una temperatura de entre 1 y 4°C.



Fotografía 4.5. Sistema de filtración con quitasatos de vidrio.

4.2.2.3. Métodos analíticos

Todos los reactivos empleados fueron de grado analítico o de calidad Suprapure (Merck, Darmstadt, Germany). Las soluciones estándar fueron Merck Certificado AA (Merck). En todos los experimentos se utilizó agua Milli-Q (Distiller AC-L4. Optic Ivymen System).

Para la determinación de la concentración de sulfatos se empleó un fotómetro de la casa comercial Macherey-Nagel (Fotómetro FP-11) (Fotografía 4.6) La determinación se basa en el método turbidimétrico, según el cual el sulfato contenido en una muestra reacciona con cloruro bórico en medio ácido. La precipitación en forma de cristales de sulfato de bario es susceptible de ser medida por la absorbancia lumínica que produce.



Fotografía 4.6. Fotómetro para análisis de sulfatos.

El equipo empleado para la realización de los análisis de los metales fue un Espectrofotómetro de Absorción Atómica Perkin-Elmer AAS (AAAnalyst modelo 800) equipado con un atomizador de llama de aire-acetileno y con un horno de grafito (Fotografía 4.7). La introducción de las muestras se llevó a cabo utilizando el inyector automático Perkin-Elmer (modelo AS800). Las lámparas de cátodo hueco (HCL) y de descarga de electrones (EDL) se utilizan como fuentes de radiación (Perkin-Elmer Lumina™).



Fotografía 4.7. Absorción Atómica Perkin-Elmer AAS (AAAnalyst 800).

4.2.2. Muestras de sedimentos

4.2.2.1. Selección de parámetros

En las muestras de sedimentos tomadas se analizaron y estudiado las relaciones existentes entre los siguientes parámetros:

- Elementos principales: Al, As, Ba, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Pb, S, Ti, Zn.
- Oligoelementos: Li, Be, Sc, V, Cr, Co, Ni, Ga, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cd, Sn, Sb, Cs, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, W, Tl, Bi, Th, U.

4.2.2.2. Muestreo en campo

Para la obtención de las muestras de sedimentos se llevaron a cabo diferentes sondeos (Sondeo 1, Sondeo 2 y Sondeo 3) en el embalse Marismillas, mediante el empleo de un vibracore (Lanesky *et al.*, 1979). Sus ubicaciones (Figura 4.6) han sido definidas sobre la base de los resultados obtenidos en una campaña de geofísica previa, que revelaron anomalías magnéticas positivas (Sondeo 1 y Sondeo 2) y una anomalía magnética negativa (Sondeo 3) (Fernández *et al.*, 2013), mediante el uso de técnicas geofísicas no destructivas como el georradar, magnetómetro de protones y gravímetro. En este estudio se pretendía determinar la existencia de patrones detectables en la distribución de las cargas metálicas que permitiesen optimizar la exploración y prospección posterior, en su caso, dando como resultados las anomalías mencionadas.

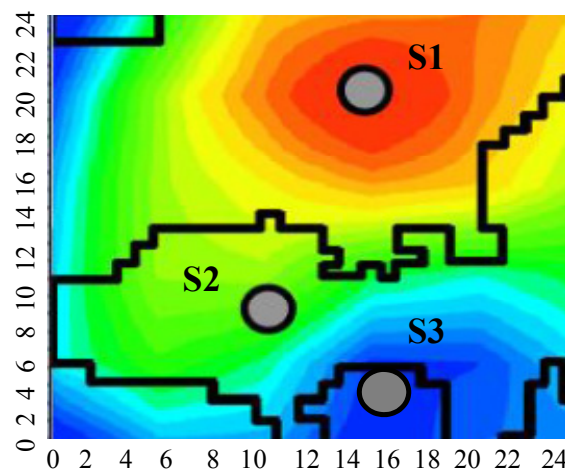


Figura.4.6. Representación de las anomalías magnéticas y sondeos realizados en el embalse Marismillas.

La profundidad alcanzada en los tres sondeos mecánicos fue de 300 cm, 310 cm y 360 cm, respectivamente. Las muestras se obtuvieron en las secciones de 0,5 cm a intervalos de 10 cm, comenzando desde la parte superior de cada núcleo, resultando un total de 105 muestras para análisis geoquímico (Fotografía 4.8).



Fotografía 4.8. Testigo de uno de los sondeos realizados en el embalse Marismillas.

4.2.2.3. Tratamiento de las muestras

Las muestras obtenidas de los sondeos (Fotografía 4.8) se secaron al aire libre, a temperatura ambiente, y fueron tamizadas para eliminar las partículas superiores a 2 mm. Para el análisis químico, las muestras fueron molidas en un mortero de ágata. Como los sedimentos se secaron hasta obtener un peso constante, los errores introducidos debido a la deshidratación de las arcillas deben ser relativamente insignificantes (Stecko y Bendell-Young, 2000).

El principal tratamiento geoquímico de preparación de las muestras para su posterior análisis fue el de "extracción ácida". El procedimiento detallado de preparación incluye los siguientes pasos:

- Digestión de 2 g de muestras de sedimentos en polvo con 10 mL de HF y 2 mL HClO₄ en un recipiente de teflón, calentándose durante 24 h en una placa calefactora a 150 °C.
- Posterior evaporación hasta la sequedad, y extracción con 3 mL de HNO₃ al 1%.
- Nueva evaporación hasta la sequedad y extracción con 3 mL de HCl.
- Finalmente, resuspensión con 100 mL de HNO₃ al 1,5%.

4.2.2.4. Métodos analíticos

Tanto para el tratamiento de las muestras como para el análisis de éstas se emplearon reactivos de grado analítico o de calidad Suprapure (Merck, Darmstadt, Germany). Las soluciones estándar fueron Merck Certificado AA (Merck). En todos los experimentos se utilizó agua Milli-Q (Distiller AC-L4. Optic Ivymen System).

Los principales elementos se midieron mediante el empleo de un ICP-OES (Jobin Yvon Ultima2), mientras que los oligoelementos se midieron por ICP-MS (Agilent 7700)

CAPITULO 5

**RESULTADOS, DISCUSION Y CONCLUSIONES
PARCIALES OBTENIDAS MEDIANTE
TRATAMIENTO GRAFICO-ESTADISTICO Y
LOGICA BORROSA**

5. RESULTADOS, DISCUSION Y CONCLUSIONES PARCIALES OBTENIDAS MEDIANTE TRATAMIENTO GRAFICO-ESTADÍSTICO Y LOGICA BORROSA

5.1. INTRODUCCIÓN

La estructura de este apartado queda justificada por la gran masa de datos disponible que ha permitido la obtención de un elevado número de publicaciones en revistas indexadas en bases de datos con índices de calidad relativos.

Ya que el desarrollo de la investigación dentro del proyecto ha conducido a la obtención de conclusiones parciales en cada uno de los artículos, y para facilitar la comprensión al lector de esta memoria, se ha creído conveniente redactar este apartado con una estructura que permita el máximo ajuste al contenido de cada uno de los objetivos perseguidos en la estructura general de la Tesis, sin vernos obligados a caer en duplicidad de contenidos comunes a todas, como materiales y métodos, ámbito de trabajo, etc.

Los resultados proceden de seis grandes masas de datos independientes, correspondientes a las dos campañas de muestreo realizadas, ya referidas en el Capítulo de Materiales y Métodos:

- Primer año hidrológico (Octubre de 2011 a Mayo del 2012)
 - Masa 1: Muestreo de agua bimensual en todos los embalses objeto de estudio durante todo el año hidrológico.
 - Masa 2: Muestreo de agua en profundidad llevado a cabo, de manera puntual, en la presa del embalse El Sancho (Octubre del 2011).
 - Masa 3: Muestreo de sedimentos llevado a cabo, de manera puntual, durante el periodo seco del primer año hidrológico en el embalse de Marismillas (Noviembre del 2011).
 - Masa 4: Muestreo de agua llevado a cabo de manera puntual en mina Poderosa (Mayo del 2012).

- Segundo año hidrológico (Octubre de 2012 a Mayo del 2013).
 - Masa 5: Muestreo de agua semanal en el embalse El Sancho durante todo el año hidrológico.
 - Masa 6: Determinación de parámetros físico-químicos obtenidos de las sondas multiparamétricas instaladas en la cola y en la presa del embalse El Sancho durante el todo el año hidrológico.

El estudio gráfico-estadístico de cada base de datos atenderá a los siguientes apartados, empleando para los cálculos el paquete informático-estadístico STATGRAPHICS CENTURION XV.II.

5.1.1. Estudio del sumario estadístico

Se describen los parámetros estadísticos más importantes de las variables para esta investigación, como son la media, máximo y mínimo de cada variable y la varianza.

Esta herramienta ha sido ampliamente implementada en medios AMD por Cerón *et al.*, (2013b), de la Torre *et al.*, (2014a-b); Grande *et al.*, (2013b, 2014a-b); Santisteban *et al.*, (2012, 2014a-b); Lobo *et al.*, (2014) y Valente *et al.*, (2014).

5.1.2. Análisis Multivariable

Kendall (1975) define el análisis multivariable como el “conjunto de técnicas estadísticas que analizan simultáneamente más de dos variables en una muestra de observaciones”. Uno de los objetivos fundamentales de la aplicación de este análisis, según Bisquerra (1989), se centra en resumir y sintetizar grandes grupos de datos y variables, en función de ciertos objetivos, con el fin de obtener informaciones válidas que permitan una mejor comprensión del fenómeno objeto de estudio.

En nuestro ámbito de trabajo, estos métodos analíticos resultan indispensables para la interpretación de resultados.

5.1.2.1. Análisis factorial

El análisis factorial es una técnica que permite resumir la información contenida en una matriz de datos con X variables, identificando un reducido número de factores F , siendo $F < X$. Los factores representan a las variables originales, con una pérdida mínima de información. Para que el análisis factorial tenga sentido, deberán cumplirse dos condiciones: interpretabilidad y parsimonia (los fenómenos deben explicarse con el menor número de elementos posibles). Por lo tanto, el número de factores debe de ser lo más reducido posible y éstos deben ser susceptibles de interpretación sustantiva (Bisquerra, 1989).

Esta herramienta ha sido utilizada en medios AMD para el establecimiento de resultados causa-efecto por autores como Cerón *et al.*, (2013a); Tavares *et al.*, (2008) y Grande *et al.*, (2003c).

El objetivo del análisis factorial consiste en determinar un número reducido de factores que puedan representar a las variables originales. Existen diversos métodos de extracción de factores, siendo el de componentes principales el empleado en este caso, el cual permite transformar un conjunto de variables intercorrelacionadas en otro conjunto de variables no correlacionadas, denominadas factores (Bisquerra, 1989).

Los valores de la matriz de factores se pueden mejorar mediante la rotación de los ejes utilizando el método de rotación 'varimax' (Kaiser, 1985), que, en realidad, maximiza la varianza de los factores. Este método tiende a minimizar el número de variables que presentan altas saturaciones en un factor, permitiendo una interpretación más simple (Grande *et al.*, 2003c).

En su representación gráfica, cada factor simboliza un eje de coordenadas (ejes factoriales). Sobre estos ejes se proyectan las variables originales, siendo las coordenadas los respectivos coeficientes de correlación entre variable y factor. El análisis factorial finaliza con la interpretación de los factores, estudiando la composición de las saturaciones factoriales significativas de cada uno y asignándoles un nombre que resuma la información que es transportable por el conjunto de variables en estudio.

5.1.2.2. Análisis Cluster

El término de análisis cluster se utiliza para definir una serie de técnicas que tienen por objeto la búsqueda de grupos similares de variables, que se van agrupando en conglomerados en función de las proximidades entre ellas. Dada una muestra de individuos, de cada uno de los cuales se dispone de una serie de observaciones en base a sus coeficientes r de Pearson, el análisis cluster sirve para clasificarlos en grupos lo más homogéneos posible según sus proximidades.

Para el análisis cluster de las variables obtenidas se ha empleado un método "jerárquico", que permite la construcción de un árbol de clasificación denominado "dendrograma", y "aglomerativo", que comienza el análisis con tantos grupos como variables haya y continúa formando grupos de forma ascendente, para razones de proximidad sucesivamente menores. De este modo, al final del proceso todos los

casos (variables o puntos de observación) están englobados en un mismo conglomerado.

Este tipo de análisis ha sido ampliamente empleado en el estudio de medios afectados por AMD. Algunos de los autores que han empleado este tipo de análisis son: Cerón *et al.*, (2013b); Grande *et al.*, (2014a-b); Santisteban *et al.*, (2012, 2013); Lobo *et al.*, (2014); Salmerón *et al.*, (2014) y Valente *et al.*, (2014).

En este estudio, y tras comparar entre distintas medidas de proximidad y diferentes métodos de aglomeración, se ha escogido como medida de proximidad la “distancia euclídea”, que es la raíz cuadrada de la suma de las diferencias entre las variables al cuadrado, y como método aglomerativo el de “vecino más cercano”, que calcula la media de todas las variables de cada cluster. A continuación, calcula la distancia euclídea entre cada individuo y la media de su grupo, sumando después las distancias de todos los casos (Bisquerra, 1989). En cada paso, los clusters que se forman son aquellos que resultan con el menor incremento en la suma total de las distancias intracluster.

El motivo de la elección del citado método y medida de proximidad es la obtención de dendrogramas más claros y fácilmente interpretables.

5.1.2.3. Series Temporales

El estudio de las series temporales permite acercarnos al conocimiento de la evolución a través del tiempo de una determinada variable mediante secuencias de medidas hechas a intervalos regulares de tiempo (Bisquerra, 1989).

Las variables seleccionadas se representan gráficamente a lo largo del tiempo para estudiar posibles interrelaciones en su evolución temporal.

Los datos numéricos correspondientes a la evolución en el tiempo de las variables suelen ser, como en este caso, muy voluminosos. Para la comparación de la información extraíble, se procede en una primera aproximación a la representación gráfica de la masa de datos en un diagrama X-Y que muestra en abscisas el tiempo de medición y en coordenadas, los valores tomados por una o más variables, consideradas para los tiempos definidos.

Este tipo de tratamientos nos acerca gráficamente a la visualización, incluso cuantitativa, del devenir del fenómeno en estudio. No obstante, para la modelización

más precisa de los procesos y las relaciones causa-efecto, es indispensable el tratamiento gráfico-estadístico posterior de la masa de datos para contemplar las hipótesis emanadas del tratamiento gráfico.

El empleo de series temporales para el estudio de los procesos de drenaje ácido puede verse expuesto en trabajos como los de Clark (1992); de la Torre *et al.*, (2009-2014a); Grande *et al.*, (2003a, 2005a) y Sáinz *et al.*, (2002, 2004),

5.1.2.4. Función de Correlación Cruzada (FCC)

La función de correlación cruzada estima la correlación existente entre una serie temporal en un tiempo “t” y una segunda serie en un tiempo “t+k”, como función del retardo o tiempo diferencial “k”. Es particularmente útil si dos series temporales correlan entre sí y, en ese caso, para determinar si una de ellas conduce a la otra (Bisquerra, 1989).

En medios AMD, se citan como ejemplos relevantes de la aplicación de esta función los trabajos de de la Torre *et al.*, (2014a-b) y Santisteban *et al.*, (2014a-b).

5.1.2.5. Función de Auto-Correlación (FAC)

La función de auto-correlación aplicada al estudio de la evolución hidroquímica de un cauce minero es indispensable para la definición de un parámetro de gran interés definido por Grande *et al.*, (2010b) como “inercia hidroquímica” haciendo alusión al grado de oposición que muestra el cauce en estudio a las modificaciones de sus propiedades.

Para ello, la herramienta estima el valor que toma la variable en un tiempo “t” y la correlación que toma la misma variable en un tiempo “t+k”, siendo k un diferencial de retardo, susceptible de dimensionar para cada medio.

Diferentes softwars permiten al usuario definir un “confidence level” que en la propia gráfica quedará representado por las curvas asintomáticas al eje de las abscisas, mientras que en ordenadas aparecerán los coeficientes de Pearson. Aquellos valores del coeficiente de Pearson que quedan dentro del “confidence level” se corresponderán con el intervalo de tiempo dentro del cuál el sistema “recuerda” los valores contenidos.

5.1.3. Fuzzy logic

En la última década, la herramienta de “fuzzy logic” (lógica borrosa) ha emergido como una técnica eficiente para modelizar medios AMD. Algunos de los autores que emplean esta herramienta son: Aroba *et al.*, (2007); Grande *et al.*, (2005b-2014c); Jiménez *et al.*, (2009); Meech y Veiga (1997a-b, 1998); Roberts y Veiga (2001); Santisteban *et al.*, (2014c); Veiga y Meech (1994, 1995a-b, 1997) y Valente *et al.*, (2005-2009b).

La fuzzy logic (Zadeh, 1965) trabaja con reglas de razonamiento muy cercanas a la forma de pensar de los seres humanos, que es aproximada e intuitiva. La principal característica de la fuzzy logic es que permite definir valores sin concretar un valor preciso, lo que no es posible con la lógica clásica en la que se ha basado hasta ahora el desarrollo de la informática. En la lógica clásica, la pertenencia a una clase o conjunto es binaria, es decir, se pertenece o no se pertenece a él, por tanto, se trabaja solo con dos valores precisos (1 y 0, sí o no).

Como ejemplo, la fuzzy logic permite asociar cada muestra con un cierto grado de cumplimiento del prototipo “pH muy bajo”. Este grado se denomina “membership grade” $\mu_{VLpH}(x)$ del elemento $x \in X$ al conjunto “pH muy bajo”. El conjunto X se denomina universo de discurso -rango de valores- de la variable x . El rango de μ_{VLpH} varía de 0 a 1, representando cada valor, respectivamente, la no pertenencia o pertenencia absoluta al conjunto.

El grado de pertenencia es representado por una función (Von Altrock, 1995). La figura 5.1 muestra un ejemplo de función de pertenencia. Así, si se define para unas muestras la clase “pH muy bajo”, está claro que una muestra con pH = 2 pertenece al conjunto y otra con pH = 6 no pertenece, pero ¿cómo clasificamos a una muestra con pH = 3,49? En la respuesta a este tipo de preguntas es donde precisamente la lógica clásica presenta limitaciones. Nótese que, por ejemplo, un pH de 4,5 y otro de 4,6 son evaluados de forma diferente, pero mediante un ligero cambio, no mediante un umbral.

Los conjuntos borrosos son una generalización de los conjuntos tradicionales. Los casos $\mu_{VLpH}(x) = 0$ y $\mu_{VLpH}(x) = 1$ que corresponderían a los conjuntos convencionales, son solo casos especiales de los conjuntos borrosos. El uso de conjuntos borrosos definidos mediante funciones de pertenencia en expresiones lógicas se denomina “fuzzy logic”. En estas expresiones, el grado de pertenencia a un

conjunto, es el grado de certeza de la sentencia. Por ejemplo, en la figura 5.1, la expresión “el pH de la muestra es muy bajo” sería cierta en un grado de 0,67 para una muestra con pH = 4,5.

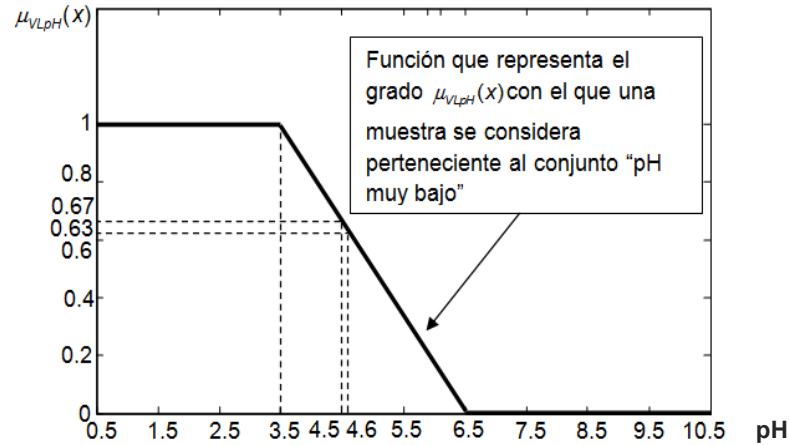


Figura 5.1. Universo de discurso X de la variable x, “pH muy bajo” para unas muestras determinadas.

La forma geométrica de las funciones de pertenencia es totalmente arbitraria, pero en general se suelen utilizar funciones de geometría sencilla y ecuación conocida, como trapecios, triángulos o sigmoides.

Una vez que todas las variables involucradas en el problema son codificadas al dominio cualitativo mediante las funciones de pertenencia, es posible escribir un conjunto de reglas que representan la relación entre las variables de entrada y las de salida. Estas reglas presentan el formato *if-then*, y están formadas por un antecedente y un consecuente, implicando el cumplimiento del antecedente la conclusión. Desde un punto de vista de una representación del conocimiento, una regla *if-then* borrosa es una estructura que representa un conocimiento impreciso. La principal característica que implica el razonamiento basado en este tipo de reglas es su capacidad de representar la coincidencia parcial, lo cual permite que una regla borrosa proporcione inferencia aún cuando la condición se satisfaga sólo de forma parcial (Yen y Langari, 1999). Las siguientes implicaciones permiten ilustrar de forma breve estas interferencias lógicas:

Si x es A, entonces y es C (Ec. 5.1)

Si x es A y z es B, entonces y es C (Ec. 5.2)

La primera regla tiene un único antecedente, es decir, del tipo “si la variable x pertenece a la clase A ”. Sin embargo, la segunda regla tiene un antecedente compuesto, siendo los antecedentes compuestos combinaciones lógicas de antecedentes sencillos.

El proceso de extraer conocimiento a partir de una base de datos se denomina KDD (*Knowledge Discovery in Data Bases*). Este proceso consta de varias etapas que van desde la preparación de los datos hasta la obtención de resultados (Fallad y Uthurusamy, 1996; Zaiane, 1999). Una de estas etapas se denomina *data mining* y puede ser definida como el proceso no trivial de extracción de información implícita, desconocida a priori y útil a partir de los datos almacenados (Holsheimer y Siebes, 1994).

5.1.3.1. La herramienta informática: Predictive Fuzzy Rules Generator (PreFuRGe) (Aroba, 2003)

Los algoritmos clásicos de clustering generan una partición de la población de forma que cada caso es asignado a un cluster. Estos algoritmos utilizan la denominada “partición rígida” que se deriva de la teoría clásica de conjuntos: Los elementos de la matriz de partición obtenida a partir de la matriz de datos solo pueden contener los valores 0 o 1, indicando el cero una pertenencia nula y el uno una pertenencia total.

La partición borrosa es una generalización de la anterior, de modo que mantiene las mismas condiciones y restricciones para sus elementos, excepto que en este caso se permite tomar valores reales entre cero y uno (grado de pertenencia parcial). Por tanto, las muestras pueden pertenecer a más de un grupo, con lo cual se extiende la capacidad de selección y agrupamiento de muestras.

El algoritmo de clustering borroso de propósito general más conocido es el denominado *Fuzzy C-Means* (FCM) (Bezdeck 1981). Está basado en la minimización de las distancias entre los puntos (datos) y los prototipos de centros de cluster (*c-means*). Este algoritmo fue utilizado (Sugeno *et al.*, 1993) para construir un modelo borroso en base a reglas de la forma:

R': Si $X \in A'$, entonces $y \in B'$ (Ec 5.3)

Donde $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathfrak{R}^n$ son las variables de entrada, $\mathbf{A} = (A_1, A_2, \dots, A_n)$ son n conjuntos borrosos, $y \in \mathfrak{R}$ es la variable de salida y B es un conjunto borroso para esta variable.

La herramienta informática desarrollada, PreFuRGe (Aroba 2003), está basada en la metodología descrita anteriormente (Sugeno y Yasukawa, 1993). Esta metodología inicial ha sido adaptada y mejorada en los siguientes aspectos:

1. Permite trabajar con bases de datos cuantitativas, con n parámetros de entrada y m de salida.
2. Las diferentes variables objeto de estudio pueden ponderarse, asignándoles pesos para el cálculo de las distancias entre los puntos del espacio que se está particionando.
3. Los conjuntos borrosos obtenidos son procesados por otro algoritmo para obtener los trapecios de las reglas gráficas (Figura 5.2).
4. Un algoritmo procesa y resuelve los casos de múltiples proyecciones en el espacio de entrada.
5. La salida proporcionada en la metodología original ha sido mejorada con un interface gráfico, que muestra el gráfico de las reglas obtenidas.
6. Un algoritmo proporciona, de manera automática, la interpretación de las reglas graficas borrosas en lenguaje natural.

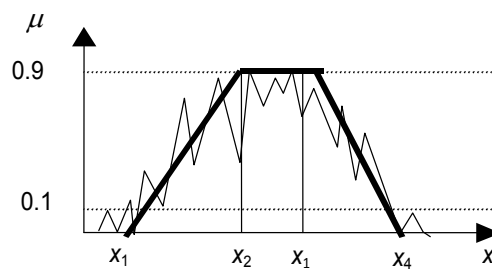


Figura 5.2. Ejemplo de algoritmo para obtener trapecios de las reglas gráficas (Aroba, 2003).

5.2. PRESENTACIÓN DE LAS MASAS DE DATOS

En este apartado se muestran los valores que toman las variables de cada masa de datos, correspondientes a los muestreos descritos en el Capítulo 4.

5.2.1. Primera campaña de muestreo

5.2.1.1. Muestreo de agua bimensual en todos los embalses durante todo el año hidrológico (Masa 1)

Las tablas 5.1 a 5.39 presentan los resultados analíticos correspondientes al muestreo de agua bimensual durante el primer año hidrológico para cada uno de los embalses objeto de estudio.

La notación n.m en algunas casillas de las tablas se corresponden con episodios de no muestreo al no circular agua en ese punto por condicionantes climáticos.

| Semana | Precipitación Campillo (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|-----------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 5,56 | 27,7 | 207,0 | 133,3 | 0,6156 | 0,2449 | 0,0015 | 0,0670 | 0,0540 | 0,0033 | n.d | 0,0079 | 0,0025 | 0,1890 | 0,7368 | 39 |
| S2 | 0,00 | 5,91 | 21,5 | 265,0 | 170,4 | 0,7370 | 0,2441 | 0,0122 | 0,8820 | 0,0540 | 0,0011 | n.d | 0,0048 | 0,0027 | 0,1320 | 0,7121 | 87 |
| S3 | 104,00 | 4,36 | 18,8 | 415,0 | 265,0 | 2,1500 | 0,1184 | 0,4010 | 1,8840 | 0,1270 | 0,0159 | n.d | 0,0036 | 0,0022 | 1,5830 | 0,2710 | 199 |
| S4 | 57,60 | 5,40 | 15,8 | 238,0 | 152,7 | 1,0960 | 0,0025 | 0,6096 | 0,0000 | 0,0750 | 0,0028 | 0,0144 | 0,0298 | 0,0034 | 0,0260 | 0,3560 | 99 |
| S5 | 66,60 | 5,63 | 13,7 | 315,0 | 201,0 | 0,2400 | 0,0080 | 0,0690 | 0,1210 | 0,2560 | 0,0035 | 0,0047 | n.d | 0,0018 | 0,0770 | 0,2340 | 81 |
| S6 | 1,00 | 5,43 | 10,9 | 292,0 | 186,8 | 0,1760 | 0,0400 | 0,1690 | 0,0890 | 0,3540 | 0,0970 | 0,0570 | n.d | 0,0012 | 0,5090 | 0,0599 | 102 |
| S7 | 6,80 | 5,42 | 12,7 | 319,0 | 205,0 | 0,3950 | 0,0075 | 0,1009 | 0,0960 | 0,0740 | 0,0330 | 0,4450 | 0,0026 | 0,0004 | 0,0380 | 0,1465 | 135 |
| S8 | 0,40 | 5,40 | 11,3 | 308,0 | 200,0 | 0,0110 | 0,0021 | 0,3190 | 1,8010 | 0,0970 | 0,0670 | 0,2460 | 0,0012 | 0,0011 | 0,0710 | 0,9946 | 132 |
| S9 | 14,20 | 5,20 | 12,5 | 342,0 | 219,0 | 0,1250 | 0,0703 | 0,3570 | 0,3510 | 0,0910 | 0,0073 | 0,0041 | n.d | n.d | 0,0460 | 0,2880 | 250 |
| S10 | 5,00 | 5,40 | 8,0 | 369,0 | 236,0 | 0,2340 | 0,0660 | 0,3360 | 0,2910 | n.d | 0,0142 | 0,0156 | n.d | n.d | 0,1940 | 0,3560 | 172 |
| S11 | 0,00 | 5,69 | 15,5 | 300,0 | 192,2 | 0,0760 | 0,0776 | 0,1990 | 0,0210 | n.d | 0,0500 | 0,0001 | n.d | 0,0002 | 0,3970 | 0,2519 | 122 |
| S12 | 0,80 | 6,10 | 18,8 | 435,0 | 276,0 | 0,1368 | 0,6010 | 0,0170 | 0,1310 | n.d | 0,0240 | 0,0013 | n.d | n.d | 0,0830 | 0,3749 | 178 |
| S13 | 17,60 | 6,05 | 18,5 | 410,0 | 258,0 | 0,9960 | 0,5870 | 0,0196 | 0,1120 | n.d | 0,0350 | 0,0014 | n.d | n.d | 0,0960 | 0,3891 | 138 |
| S14 | 40,20 | 5,85 | 18,4 | 401,0 | 252,0 | 0,1460 | 0,3460 | 0,0214 | 0,2460 | 0,0026 | 0,0790 | 0,0003 | n.d | n.d | 0,0670 | 0,2470 | 148 |
| S15 | 24,20 | 5,77 | 18,2 | 399,0 | 255,0 | 0,1370 | 0,2670 | 0,0270 | 16,0500 | 0,0160 | 0,1250 | n.d | 0,0003 | n.d | 0,0480 | 0,7032 | 147 |
| S16 | 51,80 | 5,25 | 19,1 | 389,0 | 249,0 | 0,3100 | 0,3530 | 0,0340 | 0,0000 | 0,0430 | 0,0011 | 0,0079 | 0,0001 | 0,0022 | 0,2560 | 1,0200 | 145 |
| S17 | 31,80 | 5,80 | 27,9 | 209,0 | 133,4 | 0,1730 | 0,0170 | 0,0310 | 0,6710 | 0,0160 | n.d | n.d | n.d | n.d | 0,3560 | 1,0170 | 159 |

Tabla 5.1. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Agrío (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 μg/L; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo).

| Semana | Precipitación Campillo (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|-----------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S2 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S3 | 104,00 | 4,19 | 18,2 | 430,0 | 275,0 | 2,3988 | 0,9549 | 0,4330 | 1,9040 | 0,1190 | 0,0031 | 0,0000 | 0,0004 | 0,0058 | 1,8440 | 0,2781 | 250 |
| S4 | 57,60 | 5,44 | 15,6 | 232,0 | 148,3 | 0,0079 | 0,0010 | 0,0570 | 0,0006 | 0,1050 | 0,0031 | 0,0018 | 0,0721 | 0,0008 | 0,4020 | 0,3930 | 102 |
| S5 | 66,60 | 5,74 | 13,6 | 256,0 | 164,6 | 0,6940 | 0,0275 | 0,1150 | 0,1500 | 0,2750 | 0,0092 | 0,0025 | 0,0000 | 0,0025 | 0,4750 | 0,5280 | 82 |
| S6 | 1,00 | 5,60 | 11,8 | 281,0 | 180,2 | 0,1960 | 0,0400 | 0,1370 | 0,0380 | 0,3620 | 0,2120 | 0,2780 | 0,0000 | 0,0018 | 0,5890 | 0,3110 | 90 |
| S7 | 6,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S8 | 0,40 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S9 | 14,20 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S10 | 5,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S11 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S12 | 0,80 | 6,12 | 17,7 | 608,0 | 387,0 | 0,0094 | 0,0138 | 0,0099 | 0,1090 | 0,0000 | 0,0590 | 0,0024 | 0,0152 | n.d | 0,1030 | 0,4390 | 95 |
| S13 | 17,60 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S14 | 40,20 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S15 | 24,20 | 5,75 | 17,8 | 550,0 | 350,0 | 0,2450 | 0,0042 | 0,0270 | 0,0780 | 0,0160 | 0,1260 | 0,0019 | 0,0009 | 0,0000 | 0,1660 | 0,6940 | 99 |
| S16 | 51,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S17 | 31,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |

Tabla 5.2. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Agrío (n.m: No medido; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 6,15 | 24,8 | 364,0 | 231,0 | 0,6709 | 0,2234 | 0,0569 | 0,3230 | 0,0780 | 0,0010 | 0,0000 | 0,0092 | 0,0017 | 0,0002 | 0,1481 | 130 |
| S2 | 0,00 | 5,38 | 21,1 | 316,0 | 203,0 | 0,5535 | 0,0078 | 0,2903 | 0,2880 | 0,0600 | 0,0015 | 0,0000 | 0,0048 | 0,0010 | 0,0003 | 0,1547 | 170 |
| S3 | 68,60 | 4,52 | 20,3 | 286,0 | 183,1 | 0,1863 | 0,2379 | 0,0820 | 2,9810 | 0,1210 | 0,0027 | 0,0000 | 0,0029 | 0,0067 | 1,1620 | 0,2660 | 137 |
| S4 | 56,80 | 2,73 | 16,4 | 1247,0 | 798,0 | 25,7800 | 0,6940 | 0,8120 | 0,3150 | 0,8840 | 0,0253 | 0,0206 | 0,0077 | 0,0003 | 0,4370 | 0,3250 | 474 |
| S5 | 66,60 | 3,51 | 16,7 | 402,0 | 257,0 | 6,9730 | 0,1250 | 0,3490 | 0,3700 | 0,2570 | 0,0099 | 0,0026 | 0,0000 | 0,0022 | 0,2110 | 0,4070 | 99 |
| S6 | 0,40 | 2,85 | 15,3 | 793,0 | 505,0 | 13,0260 | 0,7060 | 1,0300 | 0,9910 | 0,3480 | 0,1700 | 0,2410 | 0,0000 | 0,0006 | 0,7710 | 0,4330 | 278 |
| S7 | 3,80 | 2,82 | 13,4 | 1008,0 | 646,0 | 25,4400 | 0,9240 | 1,6060 | 1,6480 | 0,0820 | 0,0650 | 0,4860 | 0,0042 | 0,0004 | 0,0420 | 0,5944 | 284 |
| S8 | 0,40 | 3,02 | 14,2 | 875,0 | 560,0 | 13,9300 | 0,6770 | 1,3960 | 1,9760 | 0,6000 | 0,0570 | 0,3640 | 0,0036 | 0,0002 | 0,0620 | 0,6974 | 290 |
| S9 | 15,80 | 2,91 | 11,9 | 962,0 | 616,0 | 19,9400 | 0,1409 | 1,6100 | 2,0460 | 0,1560 | 0,0265 | 0,0041 | 0,0008 | 0,0004 | 0,0890 | 0,7950 | 302 |
| S10 | 0,00 | 2,94 | 15,2 | 927,0 | 596,0 | 18,8600 | 0,9400 | 2,1460 | 1,9960 | 0,0063 | 0,0663 | 0,0911 | 0,0101 | 0,0002 | 0,1530 | 0,8286 | 312 |
| S11 | 0,80 | 2,74 | 12,7 | 1592,0 | 1019,0 | 73,2000 | 2,8600 | 3,9810 | 4,1730 | 0,0112 | 0,1490 | 0,0407 | 0,0276 | 0,0017 | 0,3720 | 0,7740 | 282 |
| S12 | 0,00 | 2,79 | 21,3 | 1710,0 | 1096,0 | 14,0300 | 1,1300 | 3,3550 | 5,5300 | 0,0084 | 0,0920 | 0,0659 | 0,0000 | 0,0010 | 0,0850 | 0,7540 | 532 |
| S13 | 2,80 | 2,57 | 18,5 | 1801,0 | 1153,0 | 20,0600 | 2,0610 | 4,1160 | 6,5410 | 0,0125 | 0,1620 | 0,0361 | 0,0052 | 0,0020 | 0,3310 | 0,5010 | 368 |
| S14 | 54,10 | 2,54 | 17,2 | 1880,0 | 1204,0 | 60,5700 | 2,8180 | 3,3660 | 5,8380 | 0,0104 | 0,1310 | 0,0537 | 0,3175 | 0,0030 | 0,4590 | 0,4370 | 858 |
| S15 | 9,80 | 2,36 | 15,1 | 2350,0 | 1507,0 | 61,7200 | 3,8420 | 4,2100 | 0,2530 | 0,0260 | 0,2080 | 0,0197 | 0,0086 | 0,0020 | 0,0840 | 0,5630 | 792 |
| S16 | 47,60 | 2,45 | 21,5 | 1735,0 | 1111,0 | 25,0200 | 0,7350 | 3,2400 | 8,4390 | 0,0590 | 0,0400 | 0,0695 | 0,0208 | 0,0069 | 0,4030 | 0,7490 | 630 |
| S17 | 19,20 | 2,34 | 31,1 | 1223,0 | 782,0 | 212,1300 | 5,4820 | 7,6620 | 9,0330 | 0,0330 | 0,1620 | 0,0012 | 0,3720 | 0,0047 | 0,4320 | 0,5040 | 1310 |

Tabla 5.3. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Andévalo-Cobica (Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S2 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S3 | 68,60 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S4 | 56,80 | 2,46 | 15,2 | 2010,0 | 1289,0 | 270,8400 | 3,4710 | 5,2770 | 6,5800 | 0,0930 | 0,0808 | 0,0006 | 1,1580 | 0,0000 | 0,3150 | 0,6450 | 930 |
| S5 | 66,60 | 3,26 | 15,3 | 571,0 | 366,0 | 0,0626 | 0,2600 | 0,4760 | 0,3650 | 0,2790 | 0,0018 | 0,0000 | 0,0282 | 0,0004 | 0,9970 | 0,4490 | 142 |
| S6 | 0,40 | 2,69 | 14,4 | 1021,0 | 656,0 | 25,7160 | 1,1190 | 1,7890 | 1,4900 | 0,3560 | 0,2070 | 0,0610 | 0,0057 | 0,0000 | 0,2660 | 0,4700 | 278 |
| S7 | 3,80 | 2,71 | 11,9 | 1225,0 | 785,0 | 52,4500 | 1,5130 | 2,7760 | 2,3640 | 0,0830 | 0,1150 | 0,4910 | 0,0189 | 0,0003 | 0,0360 | 0,6284 | 484 |
| S8 | 0,40 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S9 | 15,80 | 2,58 | 12,0 | 1544,0 | 988,0 | 100,7600 | 3,3720 | 3,3260 | 16,4320 | 0,1340 | 0,0340 | 0,0056 | 0,2410 | 0,0000 | 0,0650 | 0,7471 | 668 |
| S10 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S11 | 0,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S12 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S13 | 2,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S14 | 54,10 | 2,32 | 17,7 | 2800,0 | 1793,0 | 124,0200 | 6,4730 | 4,7880 | 9,4100 | 9,7990 | 0,2380 | 0,0833 | 0,9380 | 0,0041 | 0,4950 | 0,0486 | 1430 |
| S15 | 9,80 | 2,25 | 15,4 | 2845,0 | 1896,0 | 117,9500 | 5,6700 | 4,8950 | 8,1640 | 10,2400 | 0,3140 | 0,0580 | 0,1470 | 0,0035 | 0,2190 | 0,1347 | 1041 |
| S16 | 47,60 | 2,24 | 19,5 | 2600,0 | 1661,0 | 282,8100 | 1,5750 | 4,5970 | 9,5720 | 0,0760 | 0,1120 | 0,0733 | 0,0267 | 0,0088 | 0,3860 | 0,5880 | 986 |
| S17 | 19,20 | 2,31 | 30,2 | 1493,0 | 955,0 | 220,5000 | 7,1070 | 8,4270 | 8,2520 | 0,0370 | 0,2050 | 0,0019 | 0,5246 | 0,0057 | 0,4520 | 0,5112 | 172 |

Tabla 5.4. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Andévalo-Cobica (n.m: No medido; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 5,55 | 26,4 | 353,0 | 226,0 | 0,8058 | 0,4420 | 0,4880 | 1,3620 | 0,0590 | 0,0265 | n.d | 0,0056 | 0,0036 | 0,0550 | 0,2768 | 140 |
| S2 | 0,00 | 3,46 | 24,5 | 1130,0 | 723,0 | 2,6088 | 2,1260 | 7,9800 | 14,0400 | 0,0740 | 0,1650 | 0,0005 | 0,0084 | 0,2137 | 0,0640 | 0,7351 | 672 |
| S3 | 68,60 | 3,16 | 22,3 | 512,0 | 328,0 | 1,4850 | 1,6224 | 0,5050 | 1,7210 | 0,1390 | 0,0000 | n.d | 0,0003 | 0,0013 | 1,5890 | 0,1027 | 194 |
| S4 | 56,80 | 3,85 | 18,9 | 331,0 | 212,0 | 1,1400 | 0,0350 | 0,1700 | 14,7320 | 0,0890 | 0,0119 | 0,0630 | 0,0055 | 0,0022 | 0,0470 | 0,4822 | 155 |
| S5 | 66,60 | 3,70 | 16,3 | 413,0 | 265,0 | 2,6430 | 0,2030 | 0,2230 | 0,8330 | 0,2630 | 0,0271 | 0,0116 | n.d | 0,0016 | 0,3610 | 0,3960 | 155 |
| S6 | 0,40 | 4,57 | 16,5 | 274,0 | 175,5 | 7,0970 | 0,0730 | 0,1300 | 0,3880 | 0,3310 | 0,2030 | 0,0041 | n.d | 0,0013 | 0,3510 | 0,0920 | 116 |
| S7 | 3,80 | 3,75 | 10,1 | 365,0 | 233,0 | 0,3130 | 0,0728 | 0,2940 | 0,7520 | 0,0780 | 0,0520 | 0,4300 | 0,0023 | 0,0011 | 0,0310 | 0,7050 | 130 |
| S8 | 0,40 | 4,16 | 12,1 | 323,0 | 207,0 | 0,4520 | 0,0733 | 0,3440 | 2,1900 | 0,0470 | 0,0400 | 0,2440 | 0,0019 | 0,0001 | 0,0610 | 0,8417 | 132 |
| S9 | 15,80 | 4,30 | 11,6 | 365,0 | 233,0 | 0,8270 | 0,5630 | 0,6220 | 1,6680 | 0,1980 | 0,0114 | 0,0041 | n.d | 0,0005 | 0,0530 | 0,8425 | 160 |
| S10 | 0,00 | 4,77 | 12,0 | 318,0 | 203,0 | 0,4070 | 0,0960 | 0,8900 | 0,9700 | 0,0002 | 0,0257 | 0,0683 | 0,0003 | n.d | 0,1510 | 0,8920 | 145 |
| S11 | 0,80 | 3,09 | 12,2 | 1767,0 | 1132,0 | 6,8600 | 4,4790 | 5,6460 | 12,6000 | 0,0117 | 0,3900 | 0,3310 | 0,0073 | 0,0034 | 0,3720 | 0,6590 | 744 |
| S12 | 0,00 | 3,40 | 20,0 | 341,0 | 219,0 | 0,6770 | 0,7000 | 0,5480 | 1,1790 | 0,0010 | 0,0400 | 0,0300 | n.d | 0,0000 | 0,0620 | 0,8536 | 153 |
| S13 | 2,80 | 2,86 | 19,6 | 2240,0 | 1432,0 | 7,9200 | 5,8260 | 6,3980 | 18,2600 | 2,9200 | 0,4950 | 0,6430 | 0,0081 | 0,0017 | 0,2360 | 0,5070 | 186 |
| S14 | 54,10 | 2,70 | 16,5 | 1985,0 | 1270,0 | 17,2500 | 5,2360 | 4,6090 | 13,0500 | 0,0083 | 0,3050 | 0,2920 | 0,0085 | 0,0016 | 0,4490 | 0,4970 | 834 |
| S15 | 9,80 | 2,66 | 16,9 | 1884,0 | 1191,0 | 12,4700 | 4,9780 | 5,0140 | 11,0900 | 0,0430 | 0,1670 | 0,3470 | 0,0035 | 0,0015 | 0,2690 | 0,3170 | 769 |
| S16 | 47,60 | 5,35 | 23,3 | 859,0 | 549,0 | 23,7900 | 0,2990 | 0,9580 | 2,5370 | 0,0460 | 0,0080 | 0,0648 | 0,0008 | n.d | 0,3150 | 0,7720 | 729 |
| S17 | 19,20 | 2,56 | 30,1 | 1540,0 | 986,0 | 110,2500 | 10,4200 | 9,8830 | 11,6100 | 0,0440 | 0,9890 | 1,1970 | n.d | n.d | 0,6140 | 0,4450 | 1590 |

Tabla 5.5. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Andévalo-Chorrito (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 μg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S2 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S3 | 68,60 | 2,24 | 22,2 | 3820,0 | 2450,0 | 1,5564 | 4,0310 | 9,5500 | 13,9200 | 0,1300 | 0,5310 | 0,1067 | 1,2795 | 0,0011 | 2,4760 | 0,3663 | 2352 |
| S4 | 56,80 | 2,36 | 17,5 | 4120,0 | 2640,0 | 421,2000 | 16,4960 | 25,5600 | 48,7350 | 0,1520 | 0,3000 | 0,5780 | 16,3200 | 0,0023 | 0,4780 | 0,7463 | 2640 |
| S5 | 66,60 | 2,42 | 17,2 | 2450,0 | 1567,0 | 156,0000 | 6,0910 | 9,2500 | 12,0550 | 0,2840 | 0,1530 | 0,1190 | 4,5570 | 0,0097 | 0,5630 | 0,5750 | 1216 |
| S6 | 0,40 | 2,46 | 14,7 | 3370,0 | 2150,0 | 231,7000 | 14,8100 | 18,7500 | 24,0200 | 0,3930 | 0,5890 | 2,1990 | 0,6800 | 0,0050 | 0,4210 | 0,0703 | 1344 |
| S7 | 3,80 | 2,64 | 7,7 | 2870,0 | 1839,0 | 128,5600 | 10,8200 | 18,9840 | 33,5500 | 0,1090 | 0,6440 | 3,0750 | 0,1481 | 0,0126 | 0,0480 | 0,1498 | 1568 |
| S8 | 0,40 | 2,80 | 10,6 | 2280,0 | 1460,0 | 49,1100 | 7,7380 | 10,0740 | 18,7500 | 0,1240 | 0,3880 | 2,1150 | 0,1151 | 0,0086 | 0,0770 | 0,4236 | 1080 |
| S9 | 15,80 | 3,35 | 10,6 | 1860,0 | 1191,0 | 23,3400 | 21,1000 | 10,2240 | 17,9100 | 0,1770 | 0,0860 | 0,4360 | 0,0157 | 0,0049 | 0,0920 | 0,5640 | 1400 |
| S10 | 0,00 | 2,85 | 10,4 | 2020,0 | 1292,0 | 25,8700 | 4,7290 | 23,9520 | 16,3700 | 0,0110 | 0,0570 | 0,3340 | 0,0014 | 0,0025 | 0,1970 | 0,6980 | 1072 |
| S11 | 0,80 | 3,13 | 10,9 | 1728,0 | 1109,0 | 6,6760 | 4,3850 | 5,3230 | 11,6840 | 0,0116 | 0,4100 | 0,2910 | 0,0051 | 0,0038 | 0,3850 | 0,6630 | 992 |
| S12 | 0,00 | 3,58 | 16,7 | 1780,0 | 1138,0 | 7,2650 | 1,6010 | 5,5790 | 14,8200 | 0,0091 | 0,3140 | 0,3730 | n.d | 0,0013 | 0,1060 | 0,7530 | 760 |
| S13 | 2,80 | 2,84 | 19,6 | 2150,0 | 1379,0 | 1,0590 | 5,7850 | 6,7180 | 28,3900 | 0,0120 | 0,4530 | 0,7280 | n.d | 0,0000 | 0,2350 | 1,1720 | 880 |
| S14 | 54,10 | 2,77 | 15,1 | 1967,0 | 1259,0 | 25,5400 | 5,2720 | 4,6700 | 12,9500 | 0,0085 | 0,3250 | 0,2540 | 0,0078 | 0,0017 | 0,3740 | 0,5059 | 1026 |
| S15 | 9,80 | 2,65 | 16,3 | 1873,0 | 1184,0 | 18,2400 | 6,3477 | 6,8490 | 19,3400 | 0,1670 | 0,4960 | 0,5170 | 0,0086 | 0,0020 | 0,3170 | 0,3470 | 987 |
| S16 | 47,60 | 5,52 | 23,3 | 852,0 | 546,0 | 0,3100 | 0,3210 | 0,9100 | 2,3450 | 0,0460 | 0,0120 | 0,1040 | n.d | 0,0024 | 0,2930 | 1,0340 | 144 |
| S17 | 19,20 | 2,52 | 30,8 | 1827,0 | 1169,0 | 152,6400 | 10,6900 | 9,9390 | 10,9900 | 0,0450 | 1,0040 | 1,2530 | 0,0842 | n.d | 0,5700 | 0,3430 | 1496 |

Tabla 5.6 Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Andévalo-Chorrito (n.m: No medido; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Campillo (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|-----------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 6,21 | 25,8 | 157,7 | 100,8 | 1,2460 | 0,0014 | 0,0017 | 0,4180 | 0,0500 | 0,0011 | n.d | 0,0074 | 0,0013 | 0,3450 | 0,1290 | 126 |
| S2 | 0,00 | 5,35 | 21,8 | 123,2 | 78,9 | 1,2550 | 0,0000 | 0,3711 | 0,1120 | 0,0520 | 0,0020 | n.d | 0,0054 | 0,0013 | 0,2640 | 0,1825 | 40 |
| S3 | 104,00 | 5,26 | 18,8 | 307,0 | 196,4 | 0,2537 | 0,0000 | 0,0650 | 2,2500 | 0,1210 | 0,0145 | n.d | 0,0010 | 0,0025 | 1,8630 | 0,9292 | 87 |
| S4 | 57,60 | 5,24 | 14,2 | 257,0 | 164,5 | 0,4040 | 0,0007 | 0,0150 | 5,3900 | 0,0750 | 0,0348 | 0,0694 | 0,0494 | n.d | 0,2340 | 0,5620 | 86 |
| S5 | 66,60 | 5,89 | 14,4 | 228,0 | 146,1 | 0,0150 | 0,0029 | 0,0240 | 0,0711 | 0,2600 | n.d | n.d | n.d | 0,0029 | 0,2060 | 0,0559 | <20 |
| S6 | 1,00 | 5,88 | 13,2 | 251,0 | 161,6 | 1,0660 | 0,0340 | 0,1920 | 0,2100 | 0,3560 | 0,0910 | 0,1840 | n.d | 0,0013 | 0,2940 | 0,8910 | <20 |
| S7 | 6,80 | 5,11 | 5,7 | 400,0 | 256,0 | 0,6040 | 0,0184 | 0,1299 | 9,2500 | 0,0730 | 0,0930 | 0,5290 | 0,0017 | 0,0004 | 0,0390 | 0,0862 | 123 |
| S8 | 0,40 | 5,54 | 11,0 | 321,0 | 206,0 | 0,0312 | 0,0023 | 0,0000 | 1,8620 | 0,9670 | 0,0033 | 0,0050 | n.d | 0,0002 | 0,0680 | 0,3860 | 77 |
| S9 | 14,20 | 5,45 | 8,2 | 347,0 | 222,0 | 0,0895 | 0,3260 | 0,0989 | 1,0130 | 0,2620 | 0,0012 | 0,0038 | n.d | 0,0002 | 0,0580 | 0,0729 | 79 |
| S10 | 5,00 | 5,73 | 8,4 | 421,0 | 270,0 | 1,1710 | 0,0483 | 0,0190 | 8,5000 | n.d | 0,0404 | 0,0198 | 0,0068 | n.d | 0,1470 | 0,2940 | 62 |
| S11 | 0,00 | 5,64 | 4,3 | 425,0 | 272,0 | 0,2071 | 0,0562 | 0,6060 | 5,9780 | 0,0036 | 0,1010 | 0,0441 | n.d | 0,3470 | 0,2490 | 0,2925 | 48 |
| S12 | 0,80 | 6,15 | 14,7 | 350,0 | 223,0 | 0,1244 | 0,5360 | 0,0143 | 1,1800 | n.d | 0,0210 | 0,0056 | n.d | n.d | 0,0590 | 0,0391 | 33 |
| S13 | 17,60 | 5,89 | 14,2 | 260,0 | 179,6 | 0,1369 | 0,5170 | 0,0246 | 1,2800 | n.d | 0,0310 | 0,0050 | n.d | n.d | 0,0690 | 0,0697 | 28 |
| S14 | 40,20 | 5,72 | 13,9 | 294,0 | 188,6 | 0,0929 | 0,0038 | n.d | 0,0890 | n.d | 0,0470 | 0,0553 | n.d | n.d | 0,3170 | 0,4280 | 34 |
| S15 | 24,20 | 6,06 | 14,5 | 320,0 | 210,0 | 0,5940 | n.d | 0,0730 | 0,0470 | 0,0154 | 0,1110 | n.d | 0,0014 | n.d | 0,0420 | 0,4830 | 32 |
| S16 | 51,80 | 5,58 | 16,5 | 296,0 | 195,0 | 0,3480 | n.d | 0,0280 | 0,0340 | 0,0104 | 0,0910 | n.d | 0,0010 | n.d | 0,0147 | 0,3170 | 29 |
| S17 | 31,80 | 5,82 | 26,3 | 93,3 | 59,6 | 0,1250 | 0,0140 | 0,0470 | 2,3600 | 0,0160 | n.d | n.d | n.d | n.d | 0,3810 | 0,5880 | 28 |

Tabla 5.7. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Campanario (n.d: No detectado; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo).

| Semana | Precipitación Campillo (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|-----------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S2 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S3 | 104,00 | 5,51 | 16,7 | 333,0 | 213,0 | 0,2205 | 0,0031 | 0,0603 | 0,0120 | 0,1330 | n.d | n.d | 0,0004 | 0,0011 | 2,0410 | 0,9854 | 92 |
| S4 | 57,60 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S5 | 66,60 | 5,81 | 13,1 | 453,0 | 289,0 | 0,0250 | 0,0041 | 0,1065 | 0,0138 | 0,2590 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0001 | 0,3300 | 0,1592 | 92 |
| S6 | 1,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S7 | 6,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S8 | 0,40 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S9 | 14,20 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S10 | 5,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S11 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S12 | 0,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S13 | 17,60 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S14 | 40,20 | 5,80 | 15,0 | 247,0 | 157,2 | 0,1330 | 0,0038 | 0,0015 | 0,0660 | 0,0000 | 0,0430 | 0,0030 | 0,0002 | 0,0000 | 0,3040 | 0,5280 | <20 |
| S15 | 24,20 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S16 | 51,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S17 | 31,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |

Tabla 5.8. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Campanario (n.m.: No medido; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo).

| Semana | Precipitación Campillo (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|-----------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 6,26 | 24,3 | 323,0 | 504,0 | 0,1150 | 0,0017 | 0,0000 | 0,1290 | 0,0560 | 0,0009 | n.d | 0,0087 | 0,0010 | 0,3100 | 0,3164 | 34 |
| S2 | 0,00 | 5,82 | 28,1 | 450,0 | 288,0 | 0,1733 | 0,0105 | 0,0026 | 0,6430 | 0,0500 | 0,0008 | n.d | 0,0035 | 0,0010 | 0,2850 | 0,0571 | 54 |
| S3 | 68,60 | 5,62 | 22,2 | 498,0 | 319,0 | 0,0029 | 0,1543 | 0,0660 | 0,0430 | 0,1340 | 0,0015 | n.d | 0,0036 | 0,0018 | 1,8780 | 0,1415 | 90 |
| S4 | 56,80 | 5,75 | 14,6 | 232,0 | 148,7 | 0,0670 | 0,0090 | 0,0458 | 0,0506 | 0,0650 | n.d | 0,0010 | 0,0001 | 0,0011 | 0,1220 | 0,2012 | 22 |
| S5 | 66,60 | 5,80 | 16,0 | 227,0 | 145,8 | 0,1880 | 0,0139 | 0,0440 | 0,0441 | 0,2680 | 0,0016 | n.d | n.d | 0,0014 | 0,5060 | 0,3146 | 61 |
| S6 | 0,40 | 6,18 | 14,0 | 331,0 | 212,0 | 1,0910 | 0,0240 | 0,0860 | 0,1380 | 0,3540 | 0,1300 | 0,1210 | n.d | 0,0007 | 0,3860 | 0,2605 | <20 |
| S7 | 3,80 | 6,06 | 12,5 | 356,0 | 228,0 | 0,3980 | 0,0033 | 0,1695 | 0,0027 | 0,0740 | 0,0550 | 0,3590 | 0,0020 | 0,0006 | 0,0360 | 0,1238 | 21 |
| S8 | 0,40 | 5,90 | 14,9 | 343,0 | 220,0 | 0,0782 | n.d | 1,0860 | 0,0505 | 0,0770 | 0,0380 | 0,1800 | 0,0019 | 0,0004 | 0,0630 | 0,2058 | 62 |
| S9 | 15,80 | 5,85 | 11,6 | 382,0 | 245,0 | n.d | 0,4670 | 0,3760 | 0,2590 | 0,2400 | 0,0029 | 0,0040 | n.d | n.d | 0,0630 | 0,1510 | 83 |
| S10 | 0,00 | 6,05 | 14,0 | 369,0 | 237,0 | 0,2460 | 0,0014 | 0,0220 | 0,2397 | n.d | n.d | 0,0027 | n.d | n.d | 0,1260 | 0,1738 | <20 |
| S11 | 0,80 | 6,25 | 15,8 | 395,0 | 251,0 | 0,0588 | 0,5040 | 0,1658 | 0,0230 | n.d | 0,0200 | 0,0013 | n.d | 0,0002 | 0,0610 | 0,0406 | 21 |
| S12 | 0,00 | 6,64 | 20,4 | 412,0 | 264,0 | 0,1360 | 0,1230 | 0,2500 | 0,1570 | n.d | 0,0098 | 0,0012 | n.d | 0,0010 | 0,0870 | 0,0950 | 22 |
| S13 | 2,80 | 5,89 | 18,5 | 388,0 | 256,0 | 0,1890 | 0,2870 | 0,1890 | 0,0920 | n.d | n.d | 0,0024 | n.d | n.d | 0,0920 | 0,1100 | <20 |
| S14 | 54,10 | 5,55 | 16,9 | 350,0 | 224,0 | 0,0721 | 0,0160 | 0,0083 | 0,0110 | n.d | 0,0310 | 0,0015 | n.d | n.d | 0,4110 | 0,1160 | <20 |
| S15 | 9,80 | 5,42 | 16,2 | 341,0 | 208,0 | 0,8490 | 0,1360 | 0,0047 | 0,1230 | 0,0450 | 0,0147 | 0,0047 | n.d | n.d | 0,2347 | 0,0978 | <20 |
| S16 | 47,60 | 5,58 | 19,3 | 404,0 | 259,0 | 0,2370 | 0,1650 | 0,9040 | 0,0160 | 0,0450 | 0,0178 | 0,0179 | 0,0008 | 0,0025 | 0,2340 | 0,1200 | <20 |
| S17 | 19,20 | 5,65 | 31,3 | 143,7 | 91,9 | 0,1112 | 0,0044 | 0,0110 | 1,2690 | 0,0160 | n.d | n.d | n.d | n.d | 0,3190 | 0,3990 | 41 |

Tabla 5.9. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Chanza (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo).

| Semana | Precipitación Campillo (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|-----------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S2 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S3 | 68,60 | 6,14 | 21,1 | 433,0 | 277,0 | 25,6650 | 6,3300 | 5,4880 | 5,4680 | 0,1300 | n.d | n.d | 0,0031 | 0,0021 | 1,8220 | 0,4879 | 36 |
| S4 | 56,80 | 5,54 | 15,2 | 235,0 | 150,3 | 0,2550 | 0,0040 | 0,1640 | 0,0888 | 0,0780 | n.d | 0,0008 | 0,0008 | 0,0012 | 0,4420 | 0,3570 | <20 |
| S5 | 66,60 | 5,65 | 15,3 | 349,0 | 225,0 | 0,1090 | 0,0020 | 0,0000 | 0,1021 | 0,2640 | 0,0002 | n.d | n.d | 0,0015 | 0,5540 | 0,1410 | <20 |
| S6 | 0,40 | 2,69 | 14,4 | 1021,0 | 656,0 | 9,7630 | 0,0130 | 0,0000 | 0,1427 | 0,3460 | 0,1300 | 0,0150 | n.d | 0,0014 | 0,4200 | 0,5850 | 34 |
| S7 | 3,80 | 5,82 | 12,2 | 334,0 | 214,0 | 0,3310 | n.d | 0,0310 | 0,0461 | 0,0750 | 0,0580 | 0,3800 | 0,0020 | 0,0012 | 0,0380 | 0,0466 | 43 |
| S8 | 0,40 | 6,04 | 14,3 | 342,0 | 219,0 | 0,1036 | n.d | 1,2060 | 0,0489 | 0,0720 | 0,0290 | 0,2550 | 0,0028 | 0,0003 | 0,0560 | 0,1966 | 33 |
| S9 | 15,80 | 5,88 | 12,2 | 378,0 | 242,0 | 0,0000 | 0,5630 | 0,1580 | 0,1210 | 0,2190 | 0,0005 | 0,0391 | 0,0000 | n.d | 0,0560 | 0,2730 | 88 |
| S10 | 0,00 | 6,03 | 14,7 | 367,0 | 235,0 | 0,2470 | 0,0018 | 0,0090 | 0,2524 | 0,0000 | n.d | 0,0018 | 0,0004 | n.d | 0,1620 | 0,2465 | 36 |
| S11 | 0,80 | 6,16 | 6,2 | 379,0 | 243,0 | 0,0463 | 0,4580 | 0,0113 | 0,0360 | 0,0000 | 0,0230 | 0,0000 | 0,0000 | n.d | 0,0710 | 0,0607 | 34 |
| S12 | 0,00 | 6,59 | 21,1 | 403,0 | 258,0 | 0,1247 | 0,3478 | 0,0347 | 0,0970 | 0,0035 | 0,0547 | 0,0002 | 0,0015 | n.d | 0,1870 | 0,1240 | 37 |
| S13 | 2,80 | 5,80 | 19,3 | 395,0 | 241,0 | 0,3470 | 0,2140 | 0,0460 | 0,0364 | 0,0001 | 0,0314 | 0,0029 | 0,0035 | n.d | 0,2960 | 0,2670 | 28 |
| S14 | 54,10 | 5,75 | 17,6 | 344,0 | 220,0 | 0,5240 | 0,0160 | 0,0010 | 0,0020 | 0,0000 | 0,0330 | 0,5910 | 0,0021 | 0,0005 | 0,4240 | 0,4175 | <20 |
| S15 | 9,80 | 5,50 | 16,9 | 348,0 | 218,0 | 0,4780 | 0,2360 | 0,0478 | 0,0347 | 0,0326 | 0,0217 | 0,3970 | 0,0075 | n.d | 0,3240 | 0,3270 | <20 |
| S16 | 47,60 | 5,78 | 19,6 | 342,0 | 219,0 | 0,2460 | 0,1940 | 0,0054 | 0,0167 | 0,0430 | 0,0088 | 0,0038 | 0,0050 | 1,9290 | 0,2410 | 0,2030 | <20 |
| S17 | 19,20 | 5,70 | 31,8 | 131,7 | 84,4 | 0,1310 | 0,0043 | 0,1160 | 1,8710 | 0,0170 | n.d | n.d | n.d | n.d | 0,3540 | 0,8170 | <20 |

Tabla 5.10. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Chanza (n.m: No medido; n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo).

| Semana | Precipitación Campillo (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|-----------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 5,86 | 27,6 | 309,0 | 197,5 | 0,2550 | 0,0030 | 0,2230 | 0,0640 | 0,0490 | 0,0008 | n.d | 0,0045 | 0,0023 | 0,1620 | 0,0036 | <20 |
| S2 | 0,00 | 5,81 | 21,6 | 300,0 | 192,3 | 0,0027 | 0,1836 | 0,0034 | 0,0840 | 0,0510 | n.d | n.d | 0,0036 | 0,0025 | 0,1720 | 0,0126 | <20 |
| S3 | 104,00 | 5,75 | 17,7 | 233,0 | 149,2 | 0,0039 | 0,0105 | 0,0587 | 1,1100 | 0,1030 | n.d | n.d | 0,0039 | 0,0031 | 1,3730 | 0,1294 | 37 |
| S4 | 57,60 | 5,76 | 17,1 | 251,0 | 160,6 | 0,3465 | 0,0032 | 0,1060 | 0,3688 | 0,0920 | 0,0080 | 0,0010 | n.d | 0,0026 | 0,2130 | 0,5260 | <20 |
| S5 | 66,60 | 5,56 | 15,3 | 234,0 | 150,1 | 0,0160 | 0,0024 | 0,1706 | 0,0173 | 0,2680 | n.d | n.d | n.d | 0,0018 | 0,4140 | 0,0372 | <20 |
| S6 | 1,00 | 5,67 | 14,0 | 261,0 | 166,9 | 0,1690 | 0,0460 | 0,0640 | 0,1550 | 0,3560 | 0,1490 | 0,3590 | 0,0004 | 0,0019 | 0,6090 | 0,0767 | <20 |
| S7 | 6,80 | 5,78 | 13,9 | 251,0 | 160,8 | 0,3810 | n.d | 0,1838 | 0,0660 | 0,0720 | 0,0530 | 0,6350 | 0,0036 | 0,0008 | 0,0390 | 0,0339 | <20 |
| S8 | 0,40 | 5,75 | 12,5 | 255,0 | 163,2 | 0,0340 | n.d | 1,2280 | 0,0180 | 0,0650 | 0,0390 | 0,2550 | 0,0035 | 0,0011 | 0,0680 | 0,2099 | <20 |
| S9 | 14,20 | 5,73 | 12,6 | 243,0 | 155,9 | 0,0876 | 0,2350 | 0,2106 | 0,0996 | 0,2820 | n.d | 0,0035 | n.d | 0,0002 | 0,0710 | 0,0775 | <20 |
| S10 | 5,00 | 5,78 | 10,3 | 261,0 | 166,2 | 0,0220 | n.d | 0,0760 | 0,1390 | n.d | 0,0012 | 0,0017 | 0,0012 | 0,0000 | 0,1380 | 0,0914 | <20 |
| S11 | 0,00 | 5,94 | 15,1 | 254,0 | 162,8 | 0,1545 | 0,0002 | 0,0540 | 0,0370 | n.d | 0,0920 | n.d | n.d | 0,0006 | 0,2250 | 0,1683 | <20 |
| S12 | 0,80 | 6,28 | 17,4 | 388,0 | 248,0 | 0,0832 | 0,4960 | 0,0143 | 0,2970 | n.d | 0,0180 | 0,0045 | n.d | 0,0005 | 0,0490 | 0,0784 | <20 |
| S13 | 17,60 | 6,17 | 15,7 | 353,0 | 223,0 | 2,1620 | 0,0037 | 0,8190 | 0,2700 | n.d | 0,0670 | 0,0077 | 0,0014 | 0,0043 | 0,2400 | 1,1830 | <20 |
| S14 | 40,20 | 5,80 | 18,0 | 251,0 | 160,9 | 0,1118 | 0,0005 | 0,0080 | 0,0250 | n.d | 0,0410 | 0,0086 | 0,0026 | 0,0008 | 0,3050 | 0,2530 | <20 |
| S15 | 24,20 | 6,28 | 19,6 | 395,0 | 250,0 | 0,0850 | n.d | 0,0420 | 0,7140 | 0,0160 | 0,0960 | 0,0015 | 0,0033 | n.d | 0,1290 | 0,1365 | <20 |
| S16 | 51,80 | 5,53 | 18,8 | 281,0 | 180,0 | 0,2280 | 0,2730 | 0,0980 | 0,0140 | 0,0430 | 0,0033 | 0,0042 | 0,0180 | 0,0117 | 0,1900 | 0,6350 | <20 |
| S17 | 31,80 | 5,97 | 26,4 | 133,2 | 85,2 | 0,0480 | 0,0051 | 0,0240 | 3,1720 | 0,0160 | n.d | n.d | n.d | n.d | 0,3520 | 0,7190 | <20 |

Tabla 5.11. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Corumbel (n.d: No detectado; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo).

| Semana | Precipitación Campillo (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|-----------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S2 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S3 | 104,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S4 | 57,60 | 5,84 | 15,8 | 192,3 | 123,1 | 0,0087 | 0,0060 | 0,7585 | 0,1114 | 0,0830 | 0,0000 | 0,0005 | 0,0006 | 0,0022 | 0,2090 | 0,1940 | <20 |
| S5 | 66,60 | 5,76 | 14,9 | 277,0 | 177,6 | 0,1100 | 0,0016 | 0,1689 | 0,0083 | 0,2580 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0028 | 0,4660 | 0,1457 | <20 |
| S6 | 1,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S7 | 6,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S8 | 0,40 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S9 | 14,20 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S10 | 5,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S11 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S12 | 0,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S13 | 17,60 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S14 | 40,20 | 5,60 | 18,5 | 257,0 | 164,6 | 0,1200 | 0,0054 | 0,1680 | n.m | 0,0000 | 0,0380 | 1,6680 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3480 | 0,2700 | <20 |
| S15 | 24,20 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S16 | 51,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S17 | 31,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |

Tabla.5.12. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Corumbel (n.m: No medido; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 3,43 | 26,2 | 343,0 | 219,0 | 0,0970 | 0,6233 | 0,6290 | 0,9350 | 0,0500 | 0,0077 | n.d | 0,0041 | 0,0007 | 0,2860 | 0,2930 | 157 |
| S2 | 0,00 | 3,65 | 25,4 | 318,0 | 204,0 | 0,3510 | 0,8501 | 0,6620 | 0,9490 | 0,0510 | 0,0080 | n.d | 0,0050 | 0,0002 | 0,3080 | 0,3100 | 248 |
| S3 | 68,60 | 3,24 | 20,9 | 298,0 | 199,7 | 0,7610 | 0,1309 | 0,5960 | 0,6670 | 0,1280 | 0,0096 | 0,0006 | 0,0040 | 0,0018 | 1,4910 | 0,2720 | 155 |
| S4 | 56,80 | 3,43 | 19,2 | 337,0 | 216,0 | 0,9900 | 0,0430 | 0,1390 | 0,5970 | 0,0860 | 0,0132 | 0,0837 | 0,0002 | 0,0024 | 0,1110 | 0,6290 | 107 |
| S5 | 66,60 | 3,60 | 15,8 | 359,0 | 230,0 | 0,4580 | 0,0590 | 0,5410 | 0,6170 | 0,2690 | 0,0142 | 0,0347 | n.d | 0,0024 | 0,3420 | 0,3630 | 136 |
| S6 | 0,40 | 3,75 | 13,4 | 319,0 | 204,0 | 0,1410 | 0,1960 | 0,5850 | 0,5920 | 0,3020 | 0,1850 | 0,0640 | 0,0005 | 0,0022 | 0,5510 | 0,3450 | 124 |
| S7 | 3,80 | 3,73 | 10,3 | 305,0 | 194,7 | 0,3630 | 0,0596 | 0,5900 | 0,7200 | 0,0750 | 0,0650 | 0,5600 | 0,0033 | 0,0008 | 0,0500 | 0,4997 | 156 |
| S8 | 0,40 | 3,68 | 10,7 | 313,0 | 201,0 | 0,4020 | 0,0657 | 0,9370 | 0,7510 | 0,0890 | 0,0520 | 0,3550 | 0,0033 | 0,0001 | 0,0780 | 0,6215 | 139 |
| S9 | 15,80 | 3,84 | 10,5 | 289,0 | 185,1 | 0,2870 | 0,0720 | 0,6300 | 0,7300 | 0,4510 | 0,0082 | 0,0032 | n.d | n.d | 0,1790 | 0,5950 | 153 |
| S10 | 0,00 | 3,78 | 9,6 | 301,0 | 192,9 | 0,2990 | 0,0660 | 0,9240 | 0,6790 | 0,6380 | 0,0956 | 0,0935 | 0,0003 | n.d | 0,2560 | 0,6320 | 147 |
| S11 | 0,80 | 3,76 | 11,6 | 305,0 | 194,8 | 0,1880 | 0,0780 | 0,5010 | 0,2140 | 0,0009 | 0,1050 | 0,0515 | n.d | 0,0002 | 0,3760 | 0,8380 | 140 |
| S12 | 0,00 | 3,93 | 13,9 | 423,0 | 270,0 | 0,1820 | 0,5430 | 0,7330 | 0,8170 | 0,0011 | 0,0240 | 0,0606 | n.d | n.d | 0,1800 | 0,7411 | 139 |
| S13 | 2,80 | 3,90 | 17,2 | 365,0 | 234,0 | 0,4800 | 0,1440 | 1,3210 | 0,7980 | n.d | 0,0720 | 0,0055 | 0,0006 | n.d | 0,3810 | 0,4930 | 126 |
| S14 | 54,10 | 3,75 | 15,3 | 288,0 | 184,1 | 1,0630 | 0,0050 | 0,7590 | 0,7270 | n.d | 1,4940 | 0,0559 | 0,0010 | n.d | 0,3560 | 0,7130 | 108 |
| S15 | 9,80 | 3,57 | 14,6 | 308,0 | 197,0 | 0,4210 | 0,0630 | 0,5040 | 0,0070 | 0,0160 | 0,1080 | 0,0095 | 0,0012 | 0,0029 | 0,1730 | 0,5080 | 49 |
| S16 | 47,60 | 3,52 | 24,6 | 221,2 | 103,5 | 0,1240 | 0,0211 | 0,2470 | 0,0049 | 0,0097 | 0,0964 | 0,0021 | 0,0010 | 0,0017 | 0,0934 | 0,3492 | 38 |
| S17 | 19,20 | 3,42 | 25,3 | 138,5 | 88,9 | 0,1380 | 0,0775 | 0,5650 | 1,2880 | 0,0170 | n.d | n.d | n.d | n.d | 0,5500 | 0,5590 | 35 |

Tabla 5.13. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse del Pino (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 μg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S2 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S3 | 68,60 | 3,20 | 20,1 | 1233,0 | 789,0 | 1,4130 | 1,6100 | 3,9800 | 3,3590 | 0,1350 | 0,0000 | 0,0011 | 0,0007 | 0,0029 | 1,9800 | 0,2500 | 632 |
| S4 | 56,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S5 | 66,60 | 3,70 | 14,7 | 912,0 | 583,0 | 0,9690 | 0,2630 | 2,1140 | 2,0000 | 0,2720 | 0,0605 | 0,0239 | 0,0033 | 0,0033 | 0,0250 | 0,7238 | 488 |
| S6 | 0,40 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S7 | 3,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S8 | 0,40 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S9 | 15,80 | 3,60 | 9,7 | 953,0 | 610,0 | 0,1930 | 0,3770 | 2,0200 | 1,9560 | 0,3030 | 0,0265 | 0,0036 | 0,0015 | 0,0003 | 0,1350 | 0,6010 | 516 |
| S10 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S11 | 0,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S12 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S13 | 2,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S14 | 54,10 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S15 | 9,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S16 | 47,60 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S17 | 19,20 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |

Tabla 5.14. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse del Pino (n.m: no medido; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 5,20 | 27,3 | 560,0 | 358,0 | 0,9229 | 0,2802 | 0,3530 | 2,4510 | 0,0510 | 0,0241 | n.d | 0,0040 | 0,0065 | 0,2250 | 0,5189 | 194 |
| S2 | 0,00 | 5,31 | 26,6 | 530,0 | 340,0 | 1,0100 | 0,3842 | 0,2930 | 3,0560 | 0,0490 | 0,0168 | n.d | 0,0054 | 0,0071 | 0,3370 | 0,4995 | 272 |
| S3 | 68,60 | 3,73 | 17,4 | 500,0 | 320,0 | 2,1020 | 0,0000 | 0,4670 | 2,5350 | 0,1230 | n.d | n.d | 0,0070 | 0,0032 | 1,5360 | 0,3085 | 254 |
| S4 | 56,80 | 4,15 | 18,6 | 465,0 | 297,0 | 0,1830 | 0,0410 | 0,3960 | 4,7480 | 0,0790 | 0,0229 | 0,0366 | 0,0035 | n.d | 0,1910 | 0,2300 | 167 |
| S5 | 66,60 | 4,01 | 12,8 | 599,0 | 381,0 | 0,2560 | 0,0775 | 0,2410 | 2,2610 | 0,2720 | 0,0262 | 0,0166 | 0,0041 | 0,0019 | 0,5950 | 0,3200 | 238 |
| S6 | 0,40 | 4,04 | 12,6 | 547,0 | 350,0 | 0,1030 | 0,1630 | 0,4980 | 2,3550 | 0,3500 | 0,2240 | 0,0109 | 0,0005 | 0,0021 | 0,4890 | 0,2940 | 171 |
| S7 | 3,80 | 3,90 | 10,2 | 467,0 | 299,0 | 0,5220 | 0,0606 | 0,6010 | 2,6680 | 0,0740 | 0,0850 | 0,4500 | 0,0060 | n.d | 0,0540 | 0,4944 | 240 |
| S8 | 0,40 | 4,09 | 10,6 | 467,0 | 299,0 | 0,0960 | 0,0619 | 0,8620 | 2,9410 | 0,0920 | 0,0480 | 0,2950 | 0,0089 | 0,0002 | 0,0680 | 0,3186 | 222 |
| S9 | 15,80 | 4,06 | 10,1 | 465,0 | 298,0 | 0,1790 | 0,0980 | 0,5400 | 2,2770 | 0,3580 | 0,0258 | n.d | 0,0003 | 0,0003 | 0,1210 | 0,5694 | 252 |
| S10 | 0,00 | 3,80 | 9,0 | 500,0 | 320,0 | 0,2050 | 0,0310 | 0,8390 | 2,6720 | 0,0004 | 0,0228 | 0,0513 | 0,0009 | n.d | 0,1700 | 0,5270 | 242 |
| S11 | 0,80 | 4,01 | 11,3 | 474,0 | 303,0 | 0,6060 | 0,0900 | 0,6860 | 1,7020 | 0,3320 | 0,0940 | 0,0303 | 0,0022 | 0,0007 | 0,2510 | 0,3760 | 193 |
| S12 | 0,00 | 4,40 | 13,3 | 521,0 | 333,0 | 0,2000 | 0,4290 | 0,5580 | 2,7760 | 0,0007 | 0,0550 | 0,0390 | n.d | n.d | 0,0830 | 0,5696 | 244 |
| S13 | 2,80 | 3,75 | 17,2 | 545,0 | 349,0 | 0,4480 | 0,1020 | 0,5530 | 2,7990 | n.d | 0,0830 | 0,0063 | 0,0017 | n.d | 0,2740 | 0,4413 | 186 |
| S14 | 54,10 | 3,60 | 15,2 | 489,0 | 314,0 | 0,1060 | 0,0701 | 0,3430 | 2,4880 | n.d | 0,0370 | 0,0246 | 0,0008 | n.d | 0,4910 | 0,2560 | 176 |
| S15 | 9,80 | 3,62 | 13,8 | 486,0 | 311,0 | 0,2310 | 0,0576 | 0,0930 | 2,6290 | 0,0160 | 0,1020 | 0,0017 | 0,0020 | n.d | 0,1470 | 0,3060 | 165 |
| S16 | 47,60 | 3,90 | 18,5 | 458,0 | 293,0 | 0,1460 | 0,0260 | 0,4350 | 2,7870 | 0,0450 | 0,0371 | 0,0232 | 0,0033 | 0,0025 | 0,2910 | 0,5730 | 154 |
| S17 | 19,20 | 3,55 | 27,0 | 258,0 | 160,9 | 0,1810 | 0,0743 | 0,3220 | 2,8550 | 0,0170 | 0,0136 | n.d | n.d | n.d | 0,4260 | 0,7080 | 197 |

Tabla 5.15. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Grande (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 μg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S2 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S3 | 68,60 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S4 | 56,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S5 | 66,60 | 4,19 | 16,2 | 1439,0 | 921,0 | 0,2850 | 3,2250 | 6,2650 | 5,0180 | 0,2780 | 0,1000 | 0,1090 | 0,0103 | 0,0085 | 0,8430 | 0,8099 | 580 |
| S6 | 0,40 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S7 | 3,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S8 | 0,40 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S9 | 15,80 | 5,45 | 9,9 | 640,0 | 411,0 | 0,1963 | 0,0600 | 0,0062 | 0,0082 | 0,3400 | 0,0210 | 0,0034 | n.d | 0,0055 | 0,0760 | 0,0823 | 286 |
| S10 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S11 | 0,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S12 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S13 | 2,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S14 | 54,10 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S15 | 9,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S16 | 47,60 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S17 | 19,20 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |

Tabla 5.16. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Grande (n.m: No medido; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 6,26 | 28,2 | 358,0 | 229,0 | 8,0680 | 0,0022 | 0,0006 | 0,0320 | 0,0500 | 0,0006 | 0,0000 | 0,0082 | 0,0247 | 0,3040 | 0,7110 | 103 |
| S2 | 0,00 | 6,48 | 28,7 | 545,0 | 349,0 | 3,5580 | 0,0047 | 0,8314 | 1,0290 | 0,0490 | 0,0029 | 0,0000 | 0,0096 | 0,0158 | 0,1080 | 0,8150 | 173 |
| S3 | 68,60 | 5,36 | 19,5 | 405,0 | 259,0 | 2,6043 | 0,0242 | 0,1960 | 3,7970 | 0,1320 | 0,0128 | 0,0000 | 0,0016 | 0,0117 | 1,4520 | 0,1607 | 137 |
| S4 | 56,80 | 5,56 | 19,5 | 402,0 | 257,0 | 0,0048 | 0,0189 | 1,5950 | 1,0310 | 0,0730 | 0,0129 | 0,0003 | n.d | 0,0015 | 0,4990 | 0,0849 | 120 |
| S5 | 66,60 | 5,70 | 14,8 | 386,0 | 247,0 | 0,0420 | 0,0000 | 0,0000 | 0,2103 | 0,8180 | 0,0015 | 0,0351 | n.d | 0,0018 | 0,4770 | 0,1272 | 164 |
| S6 | 0,40 | 5,59 | 12,7 | 388,0 | 249,0 | 0,1600 | 0,0260 | 0,0584 | 0,1342 | 0,3570 | 0,1370 | 0,0000 | 0,0006 | 0,0078 | 0,6670 | 0,2160 | 109 |
| S7 | 3,80 | 5,44 | 10,0 | 381,0 | 244,0 | 0,4850 | 0,0012 | 0,1280 | 0,0946 | 0,0710 | 0,0550 | 0,2980 | 0,0034 | 0,0070 | 0,0450 | 0,3328 | 126 |
| S8 | 0,40 | 5,24 | 11,2 | 390,0 | 249,0 | 0,0969 | 0,0013 | 0,7220 | 1,1150 | 0,0960 | 0,0480 | 0,3440 | 0,0052 | 0,0095 | 0,0570 | 0,6959 | 125 |
| S9 | 15,80 | 5,73 | 10,6 | 388,0 | 248,0 | 0,1078 | 0,0547 | 0,0380 | 0,0000 | 0,5080 | 0,0000 | 0,0028 | n.d | n.d | 0,0970 | 0,0000 | 119 |
| S10 | 0,00 | 5,59 | 10,6 | 398,0 | 255,0 | 0,2540 | 0,0114 | 0,0670 | 0,0308 | n.d | 0,0122 | 0,0022 | 0,0004 | 0,0026 | 0,1130 | 0,5130 | 127 |
| S11 | 0,80 | 5,67 | 12,3 | 409,0 | 262,0 | 0,1120 | 0,0076 | 0,1364 | 0,0090 | n.d | 0,6600 | 0,0000 | n.d | 0,0040 | 0,1550 | 0,2320 | 109 |
| S12 | 0,00 | 6,10 | 41,4 | 605,0 | 384,0 | 0,0680 | 0,6320 | 0,0115 | 0,1900 | n.d | 0,0380 | 0,0047 | n.d | 0,0015 | 0,0400 | 0,6147 | 133 |
| S13 | 2,80 | 5,84 | 16,7 | 494,0 | 316,0 | 0,0179 | 0,0112 | 0,0047 | 0,0800 | n.d | 0,0680 | 0,0031 | n.d | 0,0025 | 0,1910 | 0,1370 | 135 |
| S14 | 54,10 | 5,35 | 16,7 | 413,0 | 264,0 | 0,1018 | 0,0404 | 0,1270 | 0,0380 | n.d | 0,0320 | 0,0001 | n.d | 0,0012 | 0,5070 | 0,4066 | 141 |
| S15 | 9,80 | 5,15 | 15,3 | 418,0 | 268,0 | 0,0646 | 0,2670 | 0,0220 | 0,0290 | 0,0150 | 0,0780 | 0,0000 | 0,0020 | 0,0022 | 0,2374 | 0,4750 | 121 |
| S16 | 47,60 | 5,80 | 18,4 | 416,0 | 266,0 | 0,1680 | 0,0490 | 0,0134 | 0,1130 | 0,0450 | 0,0173 | 0,0050 | 0,0048 | 0,0171 | 0,2010 | 0,4610 | 114 |
| S17 | 19,20 | 5,34 | 28,9 | 238,0 | 151,5 | 0,1100 | 0,0074 | 0,0990 | 0,0390 | 0,0170 | n.d | n.d | n.d | n.d | 0,3350 | 0,3910 | 110 |

Tabla 5.17. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Lagunazo (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 μg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S2 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S3 | 68,60 | 5,20 | 18,2 | 672,0 | 430,0 | 0,5192 | 2,9900 | 0,2630 | 0,0790 | 0,1010 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0075 | 0,0019 | 1,9980 | 0,2092 | 262 |
| S4 | 56,80 | 5,60 | 17,0 | 742,0 | 475,0 | 0,0850 | 0,0110 | 0,0630 | 0,7452 | 0,0800 | 0,0035 | 0,0042 | 0,0000 | 0,0025 | 0,0480 | 0,4000 | 256 |
| S5 | 66,60 | 5,60 | 15,1 | 678,0 | 434,0 | 0,0520 | 0,0169 | 0,0426 | 0,0054 | 0,2810 | 0,0005 | 0,0000 | 0,0035 | 0,0023 | 1,0050 | 0,0600 | 162 |
| S6 | 0,40 | 5,66 | 12,5 | 523,0 | 335,0 | 0,1340 | 0,0730 | 0,1130 | 0,0617 | 0,3520 | 0,1890 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0071 | 0,7300 | 0,0300 | 143 |
| S7 | 3,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S8 | 0,40 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S9 | 15,80 | 5,52 | 9,4 | 840,0 | 538,0 | 0,0550 | 0,0751 | 0,7390 | 0,3460 | 0,4710 | 0,0022 | 0,0028 | 0,0000 | 0,0036 | 0,1020 | 0,2250 | 298 |
| S10 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S11 | 0,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S12 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S13 | 2,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S14 | 54,10 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S15 | 9,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S16 | 47,60 | 5,63 | 18,6 | 722,0 | 462,0 | 0,1760 | 0,0760 | 0,0147 | 0,1093 | 0,0450 | 0,0003 | 0,0062 | 0,0028 | 0,0078 | 0,2340 | 0,5984 | 172 |
| S17 | 19,20 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |

Tabla 5.18. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Lagunazo (n.m: No medido; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 6,52 | 27,3 | 136,3 | 87,2 | 1,7910 | 0,0042 | 0,0002 | 0,0063 | 0,0490 | n.d | n.d | 0,0068 | 0,0002 | 0,2460 | 0,5923 | <20 |
| S2 | 0,00 | 6,25 | 25,4 | 110,5 | 70,9 | 1,4601 | 0,0017 | 5,3000 | 0,0059 | 0,0490 | n.d | n.d | 0,0061 | 0,0066 | 0,4180 | 0,1847 | <20 |
| S3 | 68,60 | 5,43 | 17,9 | 110,6 | 70,9 | 0,0455 | n.d | 0,0989 | 5,2330 | 0,1400 | n.d | n.d | 0,0027 | 0,0041 | 1,8380 | 0,0674 | <20 |
| S4 | 56,80 | 5,88 | 17,3 | 118,1 | 75,4 | 0,3566 | n.d | 0,0010 | 0,1852 | 0,0740 | n.d | n.d | n.d | 0,0017 | 0,2930 | 0,0092 | <20 |
| S5 | 66,60 | 5,93 | 15,1 | 169,4 | 108,4 | 0,0280 | 0,0220 | n.d | 0,0184 | 0,2800 | n.d | n.d | n.d | n.d | 0,5410 | 0,1540 | <20 |
| S6 | 0,40 | 5,79 | 15,0 | 127,6 | 81,7 | 0,2090 | 0,1200 | 0,1860 | 0,0400 | 0,3500 | 0,1220 | n.d | 0,0002 | 0,0004 | 0,5760 | 0,1390 | <20 |
| S7 | 3,80 | 5,75 | 13,2 | 120,5 | 77,0 | 0,1430 | n.d | 0,1462 | 0,1210 | 0,0710 | 0,0680 | 0,2470 | 0,0038 | 0,0003 | 0,0460 | 0,2340 | <20 |
| S8 | 0,40 | 5,75 | 14,9 | 120,3 | 77,2 | 0,0322 | n.d | n.d | 0,4886 | 0,9960 | 0,0000 | 0,0050 | n.d | n.d | 0,0560 | 0,0457 | 28 |
| S9 | 15,80 | 5,67 | 14,0 | 123,3 | 79,2 | 0,0680 | 0,0036 | n.d | 0,0000 | 0,4890 | 0,0000 | 0,0026 | n.d | n.d | 0,0980 | 0,0894 | <20 |
| S10 | 0,00 | 5,72 | 15,6 | 126,0 | 80,7 | 0,1010 | 0,0100 | 0,0200 | 0,0330 | 0,0004 | 0,0144 | 0,0013 | n.d | n.d | 0,0940 | 0,3590 | <20 |
| S11 | 0,80 | 5,76 | 16,1 | 119,5 | 76,5 | 0,0110 | 0,0005 | 0,0780 | 0,0040 | n.d | 0,0660 | 0,0000 | n.d | n.d | 0,1850 | 0,3231 | <20 |
| S12 | 0,00 | 6,17 | 24,8 | 163,9 | 104,8 | 0,0890 | 0,8640 | 0,0114 | 0,0031 | n.d | 0,0400 | 0,0065 | n.d | n.d | 0,0660 | 0,3356 | <20 |
| S13 | 2,80 | 6,50 | 18,3 | 196,8 | 125,9 | 0,0130 | 0,0031 | 0,0029 | 0,0100 | n.d | 0,0650 | 0,0026 | n.d | n.d | 0,1830 | 0,1122 | <20 |
| S14 | 54,10 | 5,92 | 18,5 | 478,0 | 306,0 | 0,0797 | 0,0001 | 0,0037 | 0,2320 | n.d | 0,0270 | 0,0079 | n.d | n.d | 0,4950 | 0,1181 | 49 |
| S15 | 9,80 | 6,22 | 18,3 | 164,2 | 104,9 | 0,4870 | 7,2490 | 0,2050 | 0,0990 | 0,0150 | 0,0380 | 0,0000 | n.d | n.d | 0,2350 | 0,5890 | 28 |
| S16 | 47,60 | 5,71 | 16,4 | 134,6 | 86,3 | 1,0370 | 0,8040 | 0,0670 | 0,0000 | 0,0450 | 0,0018 | 0,0067 | 0,0033 | 0,0064 | 0,1980 | 0,1160 | <20 |
| S17 | 19,20 | 6,08 | 28,9 | 96,5 | 61,1 | 0,1400 | 0,0061 | 0,3640 | 0,1450 | 0,0170 | n.d | n.d | n.d | 0,0270 | 0,3640 | 0,2780 | <20 |

Tabla 5.19. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse La Joya (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 μg/L;

Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S2 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S3 | 68,60 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S4 | 56,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S5 | 66,60 | 5,74 | 13,3 | 328,0 | 210,0 | 0,1010 | 0,0060 | 0,0000 | 0,0072 | 0,2800 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,6720 | 0,1942 | 33 |
| S6 | 0,40 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S7 | 3,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S8 | 0,40 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S9 | 15,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S10 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S11 | 0,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S12 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S13 | 2,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S14 | 54,10 | 5,95 | 14,9 | 260,0 | 166,3 | 11,8640 | 0,2900 | 0,3050 | 0,1010 | 0,0000 | 0,0300 | 0,0117 | 0,0000 | 0,0000 | 0,4840 | 0,2647 | 20 |
| S15 | 9,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S16 | 47,60 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S17 | 19,20 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |

Tabla 5.20. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse La Joya (n.m: No medido; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Campillo (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|-----------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S2 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S3 | 104,00 | 2,13 | 18,0 | 7670,0 | 4900,0 | 314,1600 | 65,0800 | 115,2800 | 41,1000 | 0,5750 | 0,9540 | 2,7700 | 2,1895 | 0,0035 | 2,0090 | n.d | 2688 |
| S4 | 57,60 | 2,08 | 17,6 | 10050,0 | 6430,0 | 1285,7400 | 8,6000 | 129,3600 | 4,0370 | 0,7800 | 0,3280 | 2,5790 | 1,6875 | 0,0268 | 0,3520 | 0,5280 | 2904 |
| S5 | 66,60 | 2,07 | 13,8 | 8970,0 | 5740,0 | 1206,8000 | 184,5500 | 91,5000 | 10,2090 | 1,0450 | 0,6170 | 3,0070 | 0,3183 | 0,1680 | 0,6980 | n.d | 2576 |
| S6 | 1,00 | 2,42 | 16,1 | 10660,0 | 6830,0 | 1419,0000 | 223,8200 | 84,7200 | 54,9900 | 1,0110 | 0,9250 | 9,2690 | 1,0728 | 0,9650 | 0,9040 | n.d | 2400 |
| S7 | 6,80 | 2,22 | 14,0 | 10860,0 | 6950,0 | 1300,6400 | 275,9600 | 173,1200 | 54,3400 | 0,0840 | 1,1310 | 26,6800 | 4,2360 | 0,0828 | 0,1250 | n.d | 3264 |
| S8 | 0,40 | 2,15 | 12,8 | 10790,0 | 6932,0 | 1256,3210 | 398,9630 | 183,6900 | 59,3200 | 0,8210 | 1,0960 | 15,8900 | n.d | 0,0746 | 0,2980 | 0,4619 | 2834 |
| S9 | 14,20 | 2,40 | 15,5 | 10220,0 | 6540,0 | 945,4400 | 622,7000 | 189,2160 | 67,1400 | 0,9450 | 0,4690 | 6,6700 | n.d | 0,0048 | 0,4550 | n.d | 2400 |
| S10 | 5,00 | 2,29 | 18,8 | 9940,0 | 6360,0 | 765,1200 | 245,3600 | 197,8400 | 58,3600 | 0,5370 | 0,2770 | 3,5900 | 2,9630 | 0,0041 | 0,3260 | n.d | 3072 |
| S11 | 0,00 | 2,26 | 19,4 | 10770,0 | 6890,0 | 1844,6000 | 308,4800 | 97,0110 | 51,9200 | 0,4820 | 1,3810 | 10,4800 | 3,9570 | 0,0395 | 0,3310 | n.d | 1584 |
| S12 | 0,80 | 2,27 | 17,2 | 11000,0 | 7040,0 | 2953,8600 | 343,2000 | 87,0460 | 44,9600 | 0,2540 | 1,9800 | 11,2000 | 0,5443 | 0,0272 | 0,4820 | n.d | 2128 |
| S13 | 17,60 | 2,04 | 21,8 | 9900,0 | 6330,0 | 888,0000 | 210,8000 | 8,5700 | 78,3800 | 0,5080 | 1,6890 | 8,6330 | 2,0120 | 0,2103 | 0,8770 | n.d | 2246 |
| S14 | 40,20 | 2,23 | 18,3 | 6210,0 | 3970,0 | 840,3200 | 92,6700 | 4,98/0 | 23,8000 | 4,2880 | 0,8630 | 3,6450 | 0,7901 | 0,0152 | 0,7930 | n.d | 3960 |
| S15 | 24,20 | 2,13 | 19,5 | 9580,0 | 6130,0 | 2188,4800 | 247,6000 | 4,6140 | 15,3800 | 0,3690 | 1,3300 | 8,1360 | 0,7439 | 0,0366 | 0,4060 | n.d | 1584 |
| S16 | 51,80 | 2,22 | 15,1 | 8920,0 | 5710,0 | 1629,3600 | 53,4600 | 5,7710 | 18,8500 | 0,8470 | 1,3340 | 7,4200 | 3,0800 | 0,1770 | 0,5210 | n.d | 1680 |
| S17 | 31,80 | 1,92 | 31,2 | 4750,0 | 3040,0 | 2682,0000 | 238,6000 | 11,9800 | 15,9200 | 0,5310 | 1,6350 | 9,9530 | 7,9110 | 0,0270 | 0,9530 | n.d | 1536 |

Tabla 5.21. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Marismillas (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo).

| Semana | Precipitación Campillo (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|-----------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 2,67 | 23,2 | 12280,0 | 7860,0 | 1298,5600 | 455,6800 | 83,8400 | 79,1200 | 1,3200 | 1,9970 | 7,0920 | 0,0084 | 0,0486 | 0,6950 | 0,4110 | 1344 |
| S2 | 0,00 | 2,44 | 28,7 | 12130,0 | 7760,0 | 1272,3200 | 430,0000 | 80,9600 | 74,5000 | 1,3900 | 2,1530 | 7,3310 | 0,0075 | 0,0340 | 0,6320 | 0,4270 | 2130 |
| S3 | 104,00 | 2,16 | 18,0 | 8560,0 | 5470,0 | 321,5200 | 73,7900 | 145,4000 | 25,6000 | 0,7900 | 0,9710 | 3,3600 | 2,3000 | 0,0036 | 2,0830 | n.d | 2560 |
| S4 | 57,60 | 2,11 | 17,3 | 11040,0 | 7070,0 | 1082,0000 | 80,9600 | 146,4000 | 56,0500 | 0,8860 | 0,8367 | 2,5910 | 2,5017 | 0,0410 | 0,3080 | 0,8390 | 2016 |
| S5 | 66,60 | 2,09 | 13,7 | 10070,0 | 6450,0 | 1525,2000 | 228,4500 | 137,6000 | 47,4600 | 0,2710 | 0,8960 | 4,2040 | 0,3498 | 0,1670 | 0,3020 | n.d | 1176 |
| S6 | 1,00 | 2,13 | 16,7 | 12430,0 | 7960,0 | 1928,0000 | 329,3400 | 134,8800 | 64,7700 | 1,3030 | 1,1760 | 9,8930 | 1,4650 | 0,1323 | 0,8810 | n.d | 2688 |
| S7 | 6,80 | 2,22 | 13,5 | 12410,0 | 7950,0 | 1614,0800 | 381,5200 | 199,5520 | 69,3600 | 1,3270 | 1,9310 | 27,8600 | 4,8080 | 0,1328 | 0,1530 | n.d | 2800 |
| S8 | 0,40 | 2,08 | 12,6 | 11950,0 | 7949,0 | 747,6800 | 874,7000 | 223,2960 | 86,4000 | 1,3270 | 0,6070 | 6,7800 | n.d | n.d | 0,5520 | 0,5230 | 2536 |
| S9 | 14,20 | 2,38 | 15,8 | 11840,0 | 7560,0 | 963,2100 | 576,3000 | 238,6500 | 84,2100 | 1,2620 | 0,4110 | 8,5200 | n.d | n.d | 0,3980 | n.d | 1304 |
| S10 | 5,00 | 2,25 | 17,6 | 12830,0 | 8210,0 | 1336,8000 | 310,2000 | 254,6400 | 82,8200 | 1,0820 | 0,3270 | 9,1400 | 4,1710 | 0,0740 | 0,4170 | n.d | 3232 |
| S11 | 0,00 | 2,28 | 19,7 | 12800,0 | 8190,0 | 2073,6000 | 437,6000 | 6,6830 | 72,4600 | 0,9070 | 1,9940 | 14,0600 | 4,4440 | 0,0404 | 0,4680 | n.d | 1504 |
| S12 | 0,80 | 2,19 | 19,8 | 13190,0 | 8430,0 | 3117,2400 | 639,2000 | 6,7500 | 6,6700 | 0,3560 | 2,4990 | 14,7300 | 0,5324 | 0,0373 | 0,6420 | n.d | 2032 |
| S13 | 17,60 | 2,08 | 20,8 | 11930,0 | 7620,0 | 1323,6800 | 265,2800 | 8,4330 | 80,4200 | 0,8490 | 2,1040 | 11,8900 | 2,6330 | 0,2682 | 0,8680 | n.d | 2234 |
| S14 | 40,20 | 2,25 | 19,1 | 9980,0 | 6390,0 | 1352,4800 | 168,5400 | 5,9090 | 51,6400 | 7,0700 | 1,3300 | 8,8260 | 1,4090 | 0,0200 | 0,8980 | n.d | 3096 |
| S15 | 24,20 | 2,11 | 19,7 | 11980,0 | 7650,0 | 2320,2000 | 239,2000 | 5,1930 | 15,3800 | 0,7670 | 1,4210 | 11,7900 | 0,8242 | 0,0547 | 0,6180 | n.d | 1240 |
| S16 | 51,80 | 2,23 | 15,5 | 11060,0 | 7080,0 | 1985,0400 | 60,8000 | 5,8180 | 19,2000 | 1,0300 | 1,3900 | 8,1130 | 3,1150 | 0,2382 | 0,5870 | n.d | 1500 |
| S17 | 31,80 | 1,92 | 31,2 | 4750,0 | 3040,0 | 2356,0000 | 279,0000 | 12,1500 | 16,0900 | 0,7130 | 1,9050 | 11,8300 | 14,1000 | 0,0350 | 1,0930 | n.d | 996 |

Tabla 5.22. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Marismillas (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo).

| Semana | Precipitación Campillo (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|-----------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 3,41 | 29,1 | 505,0 | 324,0 | 0,8550 | 0,2440 | 2,9100 | 1,6930 | 0,0530 | 0,0016 | 0,0001 | 0,0060 | 0,0033 | 0,3310 | 0,3495 | 196 |
| S2 | 0,00 | 3,92 | 26,8 | 484,0 | 309,0 | 0,9990 | 0,1560 | 1,7300 | 1,8560 | 0,0530 | 0,2533 | n.d | 0,0038 | 0,0036 | 0,2350 | 0,3226 | 238 |
| S3 | 104,00 | 5,82 | 20,3 | 651,0 | 417,0 | 0,0530 | 0,0003 | 0,0060 | 0,3100 | 0,1230 | 0,0033 | n.d | 0,0123 | 0,0029 | 1,2150 | 0,0399 | 84 |
| S4 | 57,60 | 2,98 | 16,3 | 881,0 | 564,0 | 0,0810 | 0,0000 | 0,0608 | 8,7210 | 0,0780 | n.d | n.d | n.d | 0,0008 | 0,3570 | 0,1900 | 468 |
| S5 | 66,60 | 3,72 | 15,3 | 724,0 | 464,0 | 0,0230 | 1,4380 | 3,5590 | 1,5533 | 0,2860 | n.d | 0,0943 | 0,0041 | 0,0010 | 0,6450 | 0,5962 | 250 |
| S6 | 1,00 | 3,12 | 14,7 | 615,0 | 394,0 | 0,1680 | 1,5820 | 3,7860 | 1,7500 | 0,3700 | 0,1410 | 0,0710 | 0,0014 | 0,0040 | 0,3610 | 0,6510 | 300 |
| S7 | 6,80 | 3,28 | 13,6 | 573,0 | 366,0 | 1,8650 | 1,4980 | 3,8250 | 2,5630 | 0,0800 | 0,1110 | 1,0640 | 0,0034 | 0,0018 | 0,0380 | 0,7210 | 132 |
| S8 | 0,40 | 3,36 | 15,8 | 510,0 | 327,0 | 1,2950 | 1,1480 | 0,6370 | 0,1730 | 0,1010 | 0,0820 | 0,3600 | 0,0031 | 0,0017 | 0,0600 | 0,6950 | 191 |
| S9 | 14,20 | 3,47 | 11,7 | 623,0 | 399,0 | 1,4280 | 3,3460 | 3,2320 | 3,0400 | 0,6790 | n.d | 0,0030 | 0,0000 | n.d | 0,1370 | 0,8630 | 256 |
| S10 | 5,00 | 3,37 | 14,2 | 855,0 | 547,0 | 4,8370 | 2,3410 | 4,9970 | 3,2770 | 0,0127 | 0,1250 | 0,1899 | 0,0182 | 0,0024 | 0,0950 | 0,8680 | 416 |
| S11 | 0,00 | 3,43 | 18,2 | 586,0 | 377,0 | 2,1180 | 0,1240 | 4,4260 | 1,8050 | 0,0076 | 0,1240 | 0,1012 | 0,2124 | 0,0014 | 0,1480 | 0,7194 | 264 |
| S12 | 0,80 | 3,59 | 15,8 | 911,0 | 583,0 | 1,5410 | 2,6040 | 5,9690 | 3,7910 | 9,8920 | 0,1310 | 0,2270 | 5,7770 | 0,0035 | 0,1150 | 0,5110 | 364 |
| S13 | 17,60 | 3,85 | 16,1 | 926,0 | 591,0 | 1,0730 | 1,4500 | 5,8120 | 3,9830 | 0,0123 | 0,1110 | 0,2150 | 0,0885 | 0,0081 | 0,1220 | n.d | 380 |
| S14 | 40,20 | 2,77 | 15,0 | 1431,0 | 916,0 | 4,4900 | 6,7850 | 5,1740 | 6,0450 | 7,7100 | 0,2200 | 0,5600 | 0,0044 | 0,0033 | 0,7320 | 0,2790 | 692 |
| S15 | 24,20 | 2,79 | 17,3 | 1564,0 | 996,0 | 5,3710 | 4,2160 | 5,2400 | 4,3890 | 5,7800 | 0,1780 | 0,3289 | 0,0369 | 0,0034 | 0,2470 | 0,0390 | 578 |
| S16 | 51,80 | 2,48 | 23,6 | 2652,0 | 1569,0 | 49,3200 | 6,6610 | 5,4810 | 15,6300 | 0,1430 | 0,4930 | 2,3670 | 0,0888 | 0,0610 | 0,3280 | 0,1040 | 564 |
| S17 | 31,80 | 2,56 | 26,9 | 685,0 | 438,0 | 8,7590 | 5,8810 | 9,2350 | 6,5300 | 0,0330 | 0,1980 | 0,9580 | 0,0232 | 0,0010 | 0,4620 | 0,5980 | 133 |

Tabla 5.23. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse El Sancho (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo).

| Semana | Precipitación Campillo (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|-----------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 0,00 | 22,5 | 898,7 | 610,7 | 14,6800 | 10,4700 | 4,8960 | 5,0140 | 0,0690 | 0,2960 | 0,0023 | 0,0977 | 0,0074 | 0,4780 | 0,3670 | 634 |
| S2 | 0,00 | 0,00 | 20,8 | 918,4 | 628,9 | 15,5400 | 9,8900 | 4,1370 | 5,9630 | 0,0678 | 0,3150 | 0,0780 | 0,0795 | 0,0068 | 0,4370 | 0,3310 | 6317 |
| S3 | 104,00 | 0,00 | 17,9 | 925,4 | 634,5 | 10,3480 | 8,4670 | 3,2600 | 4,2980 | 0,1630 | 0,0978 | 0,0047 | 0,0214 | 0,0038 | 0,7970 | 0,4730 | 687 |
| S4 | 57,60 | 2,56 | 15,9 | 987,0 | 664,0 | 12,2450 | 8,3540 | 3,4980 | 4,3987 | 0,0890 | 0,0540 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0018 | 0,4870 | 0,3640 | 594 |
| S5 | 66,60 | 2,48 | 19,6 | 856,0 | 578,0 | 14,7590 | 7,6420 | 2,9970 | 4,8870 | 0,3260 | 0,0860 | 0,1140 | 0,0069 | 0,0014 | 0,5650 | 0,6314 | 661 |
| S6 | 1,00 | 2,50 | 13,1 | 748,0 | 423,0 | 18,2900 | 9,9680 | 3,0140 | 5,0140 | 0,3700 | 0,1697 | 0,1090 | 0,0064 | 0,0057 | 0,2140 | 0,5160 | 701 |
| S7 | 6,80 | 2,53 | 12,2 | 695,0 | 388,0 | 12,3970 | 8,0140 | 3,1280 | 4,9870 | 0,1360 | 0,2540 | 1,8690 | 0,0096 | 0,0020 | 0,0780 | 0,7630 | 761 |
| S8 | 0,40 | 2,61 | 12,8 | 524,0 | 437,0 | 11,2397 | 9,3480 | 3,9780 | 5,1260 | 0,3440 | 0,0863 | 0,7960 | 0,0076 | 0,0018 | 0,0900 | 0,7240 | 793 |
| S9 | 14,20 | 2,49 | 11,0 | 748,0 | 462,0 | 10,4780 | 7,6920 | 2,9460 | 5,2390 | 0,3890 | 0,0977 | 0,0986 | 0,0032 | 0,0000 | 0,1450 | 0,8460 | 815 |
| S10 | 5,00 | 2,38 | 13,8 | 898,0 | 654,0 | 18,0360 | 10,1560 | 3,3260 | 7,5480 | 0,0960 | 0,2670 | 0,2160 | 0,0248 | 0,0030 | 0,1230 | 0,9640 | 884 |
| S11 | 0,00 | 2,75 | 16,0 | 654,0 | 478,0 | 16,4700 | 9,6740 | 4,0010 | 5,1236 | 0,2360 | 0,1670 | 0,1987 | 0,2970 | 0,0035 | 0,1890 | 0,8440 | 796 |
| S12 | 0,80 | 2,74 | 16,7 | 679,0 | 492,0 | 15,6970 | 8,3140 | 3,6210 | 6,5890 | 1,3940 | 0,2300 | 0,3010 | 0,1974 | 0,0095 | 0,2640 | 0,3670 | 792 |
| S13 | 17,60 | 2,69 | 16,2 | 721,0 | 567,0 | 27,7900 | 10,9700 | 3,2640 | 6,9780 | 0,6430 | 0,1630 | 0,2240 | 0,1040 | 0,0068 | 0,3750 | 0,0970 | 826 |
| S14 | 40,20 | 2,57 | 15,2 | 1645,0 | 987,0 | 45,7800 | 13,1020 | 3,2240 | 8,7400 | 3,3400 | 0,2670 | 0,5840 | 0,4790 | 0,0043 | 0,5790 | 0,2430 | 849 |
| S15 | 24,20 | 2,58 | 18,1 | 1951,0 | 1248,0 | 31,8800 | 11,6100 | 4,9690 | 9,7710 | 5,7800 | 0,3140 | 0,9420 | 0,8693 | 0,0040 | 0,4780 | 0,4112 | 1104 |
| S16 | 51,80 | 2,40 | 21,7 | 2750,0 | 1763,0 | 52,2400 | 3,3200 | 5,4770 | 15,6900 | 0,1390 | 0,5080 | 2,1750 | 0,0667 | 0,0653 | 0,3660 | 0,0653 | 1610 |
| S17 | 31,80 | 2,34 | 25,5 | 957,0 | 613,0 | 17,9250 | 9,4450 | 9,8810 | 8,7720 | 0,0430 | 0,3500 | 1,6670 | 0,0768 | 0,0070 | 0,4940 | 0,4520 | 154 |

Tabla 5.24. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse El Sancho (Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo).

| Semana | Precipitación Campillo (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|-----------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 5,71 | 22,8 | 159,8 | 102,2 | 3,3730 | 0,5720 | 0,4200 | 0,2970 | 0,0580 | n.d | n.d | 0,0065 | 0,0037 | 0,1520 | 0,8250 | 26 |
| S2 | 0,00 | 5,82 | 20,5 | 130,7 | 836,0 | 0,8840 | 0,0024 | 0,1900 | 0,3210 | 0,0500 | 0,0003 | n.d | 0,0060 | 0,0041 | 0,3820 | 0,6990 | <20 |
| S3 | 104,00 | 5,44 | 17,5 | 115,0 | 73,6 | 3,7360 | 0,0060 | 0,0380 | 0,0040 | 0,1110 | 0,0011 | n.d | 0,0003 | 0,0016 | 1,0540 | 0,1959 | <20 |
| S4 | 57,60 | 5,96 | 13,7 | 191,6 | 122,7 | 0,1700 | 0,0211 | 0,8603 | 1,1490 | 0,0670 | n.d | 0,0018 | n.d | 0,0017 | 0,3910 | 0,1470 | 35 |
| S5 | 66,60 | 5,85 | 13,8 | 232,0 | 148,7 | 0,0500 | 0,0020 | n.d | 0,0355 | 0,2700 | n.d | n.d | n.d | 0,0031 | 0,7660 | 1,1320 | 31 |
| S6 | 1,00 | 5,83 | 13,6 | 227,0 | 145,1 | 4,8800 | 0,0580 | 0,1630 | 0,5520 | 0,3560 | 0,0380 | n.d | 0,0019 | 0,0003 | 0,6590 | 1,1870 | 21 |
| S7 | 6,80 | 5,60 | 6,7 | 239,0 | 147,6 | 1,1730 | 1,3100 | 0,1460 | 1,3100 | 0,0740 | 0,0730 | 0,5810 | 0,0012 | 0,0005 | 0,0360 | 0,1760 | 20 |
| S8 | 0,40 | 5,59 | 14,8 | 213,0 | 136,4 | 0,0187 | n.d | 0,0000 | 0,0140 | 1,0200 | n.d | 0,0047 | n.d | 0,0007 | 0,0370 | 0,0073 | 75 |
| S9 | 14,20 | 5,76 | 11,8 | 188,9 | 121,0 | 0,7920 | 0,0769 | 0,1540 | 0,3710 | 0,6480 | n.d | 0,0027 | n.d | n.d | 0,1500 | 0,9690 | 31 |
| S10 | 5,00 | 5,72 | 10,5 | 215,0 | 137,8 | 0,2483 | 0,0770 | n.d | 0,1570 | n.d | 0,0044 | 0,0001 | 0,0011 | n.d | 0,0320 | 0,2760 | 34 |
| S11 | 0,00 | 5,96 | 8,2 | 223,0 | 142,6 | 0,0526 | 0,0068 | 0,0489 | 0,0870 | n.d | 0,0530 | n.d | 0,0012 | n.d | 0,0310 | 0,3966 | 21 |
| S12 | 0,80 | 6,29 | 15,9 | 336,0 | 217,0 | 3,9210 | 1,2000 | 0,0184 | 0,3980 | n.d | 0,0590 | 0,0124 | 0,0249 | 0,0002 | 0,0180 | 1,1900 | 24 |
| S13 | 17,60 | 6,34 | 11,3 | 306,0 | 195,5 | 4,6810 | 0,1240 | 0,3130 | 0,4810 | n.d | 0,1030 | 0,0026 | 0,0917 | 0,0049 | 0,1410 | n.d | <20 |
| S14 | 40,20 | 6,04 | 15,4 | 260,0 | 167,8 | 0,3330 | 0,0298 | 0,2870 | 0,2860 | n.d | 0,0200 | 0,0024 | 0,0092 | n.d | 0,4620 | n.d | <20 |
| S15 | 24,20 | 6,17 | 14,1 | 258,0 | 165,4 | 0,0800 | 8,1250 | 0,4430 | 0,4250 | 0,0150 | 0,0450 | n.d | 0,5840 | n.d | 0,2780 | 0,6180 | 28 |
| S16 | 51,80 | 5,70 | 14,5 | 240,0 | 153,9 | 0,0250 | 0,3240 | 0,2470 | 0,0610 | 0,0480 | 0,0196 | 0,0142 | 0,0025 | 0,0066 | 0,2210 | 1,2720 | 23 |
| S17 | 31,80 | 5,85 | 26,3 | 126,0 | 128,2 | 0,1230 | 0,6490 | 0,3140 | 0,2400 | 0,0174 | 0,0365 | 0,0136 | 0,0394 | 0,0048 | 0,3140 | 0,9430 | 25 |

Tabla 5.25. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Silillos I (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo).

| Semana | Precipitación Campillo (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|-----------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S2 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S3 | 104,00 | 5,54 | 18,1 | 122,1 | 78,1 | 0,6110 | 0,0139 | 0,0517 | 0,0032 | 0,1130 | 0,0016 | 0,0000 | 0,0011 | 0,0032 | 1,1130 | 0,2306 | 35 |
| S4 | 57,60 | 5,91 | 16,0 | 179,8 | 115,2 | 0,2600 | 0,0000 | 0,0190 | 0,9770 | 0,0850 | 0,0000 | 0,0006 | 0,0000 | 0,0021 | 0,2070 | 0,1560 | 20 |
| S5 | 66,60 | 5,87 | 13,4 | 237,0 | 151,7 | 1,0680 | 0,0690 | 0,0880 | 0,1867 | 0,2700 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0019 | 0,3640 | 0,1080 | 28 |
| S6 | 1,00 | 5,99 | 13,5 | 269,0 | 171,9 | 4,9680 | 0,0390 | 0,2890 | 0,1250 | 0,3570 | 0,0350 | 0,0000 | 0,0019 | 0,0016 | 0,6200 | 1,0920 | 28 |
| S7 | 6,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S8 | 0,40 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S9 | 14,20 | 6,06 | 10,3 | 221,0 | 141,6 | 0,0161 | 0,0050 | 0,0000 | 0,0330 | 0,7270 | 0,0000 | 0,0023 | 0,0000 | 0,0002 | 0,1440 | 0,3160 | <20 |
| S10 | 5,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S11 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S12 | 0,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S13 | 17,60 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S14 | 40,20 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S15 | 24,20 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S16 | 51,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S17 | 31,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |

Tabla 5.26. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Silillos I (n.m: No medido; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo).

| Semana | Precipitación Campillo (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|-----------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 5,58 | 22,8 | 154,0 | 98,3 | 0,2089 | 0,0143 | 0,0300 | 0,0900 | 0,0480 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0066 | 0,0002 | 0,2910 | 0,0263 | <20 |
| S2 | 0,00 | 5,83 | 23,1 | 137,0 | 880,0 | 0,0021 | 0,0115 | 0,3330 | 0,6730 | 0,0490 | 0,0007 | 0,0000 | 0,0060 | 0,0003 | 0,2700 | 0,0296 | 26 |
| S3 | 104,00 | 5,60 | 18,2 | 132,8 | 85,0 | 0,0011 | 0,0000 | 0,3643 | 0,3160 | 0,1230 | 0,0003 | 0,0000 | 0,0015 | 0,0025 | 1,7590 | 0,1236 | 30 |
| S4 | 57,60 | 5,97 | 16,9 | 138,9 | 89,0 | 0,0369 | 0,0012 | 0,3600 | 0,2251 | 0,0690 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0025 | 0,2030 | 0,0000 | <20 |
| S5 | 66,60 | 5,82 | 14,3 | 251,0 | 160,5 | 0,0497 | 0,0229 | 0,1070 | 0,0040 | 0,2750 | 0,0003 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0037 | 0,5140 | 1,2040 | 31 |
| S6 | 1,00 | 5,95 | 14,5 | 179,9 | 115,2 | 4,0120 | 0,1140 | 0,2200 | 0,0370 | 0,3530 | 0,0570 | 0,0000 | 0,0176 | 0,0009 | 0,2110 | 1,1550 | 21 |
| S7 | 6,80 | 5,40 | 9,5 | 160,2 | 102,5 | 0,5410 | 0,0000 | 0,0581 | 0,1152 | 0,0730 | 0,0830 | 0,5610 | 0,0015 | 0,0004 | 0,0410 | 0,1866 | 25 |
| S8 | 0,40 | 5,48 | 14,6 | 154,2 | 98,7 | 0,0484 | 0,0017 | 0,0000 | 0,0300 | 1,0320 | 0,0000 | 0,0045 | 0,0000 | 0,0002 | 0,0210 | 0,0118 | <20 |
| S9 | 14,20 | 5,58 | 10,9 | 159,0 | 101,8 | 0,0933 | 0,0268 | 0,2480 | 0,0640 | 0,9450 | 0,0010 | 0,0023 | 0,0000 | 0,0014 | 0,1520 | 0,8139 | 28 |
| S10 | 5,00 | 5,67 | 10,2 | 165,8 | 106,1 | 0,2540 | 0,0258 | 0,0191 | 0,0297 | 0,0000 | 0,0030 | 0,0000 | 0,0017 | 0,0000 | 0,0610 | 0,2080 | <20 |
| S11 | 0,00 | 5,64 | 10,9 | 156,3 | 100,1 | 0,0972 | 0,0040 | 0,0631 | 0,0190 | 0,0000 | 0,0470 | 0,0000 | 0,0023 | 0,0010 | 0,0200 | 0,5891 | 26 |
| S12 | 0,80 | 6,37 | 15,1 | 228,0 | 146,2 | 0,0847 | 0,1330 | 0,0244 | 0,0480 | 0,0000 | 0,0240 | 0,0109 | 0,0000 | 0,0005 | 0,0310 | 0,7652 | 26 |
| S13 | 17,60 | 6,37 | 15,0 | 212,0 | 135,9 | 0,0310 | 0,0065 | 0,0211 | 0,0800 | 0,0000 | 0,0610 | 0,0024 | 0,0485 | 0,0004 | 0,1650 | 0,0161 | 32 |
| S14 | 40,20 | 5,98 | 15,6 | 225,0 | 144,5 | 1,2900 | 0,8310 | 0,6190 | 0,2120 | 0,0009 | 0,0290 | 0,0206 | 0,0003 | 0,0008 | 0,5380 | 0,2237 | 50 |
| S15 | 24,20 | 6,30 | 15,5 | 238,0 | 151,0 | 1,5780 | 7,7600 | 0,0340 | 0,0990 | 0,0150 | 0,0470 | 0,0367 | 0,0021 | 0,0031 | 0,2470 | 0,2160 | 127 |
| S16 | 51,80 | 5,63 | 17,7 | 190,4 | 122,1 | 0,1720 | 0,5090 | 0,0073 | 0,0329 | 0,0460 | 0,0005 | 0,0055 | 0,0005 | 0,0033 | 0,1910 | 0,6400 | 38 |
| S17 | 31,80 | 5,90 | 27,3 | 80,3 | 51,6 | 0,1050 | 0,0100 | 0,0110 | 0,9240 | 0,0170 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,4030 | 0,7270 | 33 |

Tabla 5.27. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Silillos II. (Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo).

| Semana | Precipitación Campillo (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|-----------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S2 | 0,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S3 | 104,00 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S4 | 57,60 | 5,82 | 13,0 | 237,0 | 151,8 | 0,0102 | 0,0016 | 0,0347 | 0,0267 | 0,0690 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0015 | 0,5290 | 0,0120 | 62 |
| S5 | 66,60 | 5,76 | 12,9 | 353,0 | 226,0 | 0,0142 | 0,0042 | 0,0000 | 0,0088 | 0,2750 | 0,0225 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0028 | 0,2700 | 1,1420 | 58 |
| S6 | 1,00 | 5,97 | 11,3 | 322,0 | 206,0 | 4,2990 | 0,0410 | 0,1580 | 0,0476 | 0,3510 | 0,1740 | 0,0000 | 0,0023 | 0,0008 | 0,5480 | 1,2010 | 45 |
| S7 | 6,80 | 5,53 | 7,4 | 277,0 | 178,2 | 0,4810 | N.D | N.D | 0,0141 | 0,0750 | 0,0720 | 0,5760 | 0,0004 | 0,0006 | 0,0430 | 0,3316 | 52 |
| S8 | 0,40 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S9 | 14,20 | 5,50 | 9,2 | 266,0 | 170,5 | 0,0165 | 0,0069 | 0,0000 | 0,0121 | 0,6950 | 0,0000 | 0,0025 | 0,0000 | 0,0001 | 0,1380 | 0,3220 | 38 |
| S10 | 5,00 | 5,76 | 10,1 | 272,0 | 174,7 | 0,2510 | 0,0482 | 0,0381 | 0,0287 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0013 | 0,0000 | 0,0720 | 0,2030 | 41 |
| S11 | 0,00 | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0 |
| S12 | 0,80 | 6,26 | 12,6 | 415,0 | 266,0 | 0,0708 | 0,0750 | 0,0182 | 0,0040 | 0,0000 | 0,0210 | 0,0138 | 0,0027 | 0,0000 | 0,0400 | 0,9160 | 41 |
| S13 | 17,60 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S14 | 40,20 | 6,05 | 15,2 | 325,0 | 208,0 | 0,0780 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0356 | 0,0000 | 0,0340 | 0,0000 | 0,0003 | 0,0008 | 0,5270 | 0,1510 | 21 |
| S15 | 24,20 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| S16 | 51,80 | 5,62 | 15,8 | 281,0 | 179,6 | 0,1770 | 0,3930 | 0,0079 | 0,0982 | 0,0460 | 0,0003 | 0,0061 | 0,0045 | 0,0062 | 0,2360 | 1,0030 | 31 |
| S17 | 31,80 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |

Tabla 5.28. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Silillos II (n.m: no medido; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 4,80 | 27,2 | 792,0 | 507,0 | 3,7238 | 1,2630 | 1,5700 | 2,1350 | 0,0520 | 0,0111 | n.d | 0,0079 | 0,0015 | 0,2280 | 0,3832 | 312 |
| S2 | 0,00 | 3,25 | 25,3 | 1801,0 | 1152,0 | 1,0410 | 0,0165 | 2,5400 | 3,5330 | 0,0580 | 0,0159 | n.d | 0,0091 | 0,0016 | 0,2390 | 0,2927 | 788 |
| S3 | 68,60 | 2,98 | 17,6 | 1434,0 | 918,0 | 1,8920 | 1,7058 | 4,2300 | 2,9190 | 0,1190 | n.d | n.d | 0,0032 | 0,0011 | 1,9400 | 0,2314 | 552 |
| S4 | 56,80 | 4,44 | 15,6 | 675,0 | 431,0 | 1,3870 | 0,1400 | 1,3310 | 0,1014 | 0,0750 | 0,0088 | 0,0160 | 0,0010 | 0,0033 | 0,2770 | 0,2510 | 464 |
| S5 | 66,60 | 5,46 | 14,1 | 499,0 | 319,0 | 0,3830 | 0,2270 | 0,5960 | 0,3000 | 0,2780 | 0,0000 | 0,0017 | 0,0000 | 0,0009 | 0,7980 | 0,3950 | 199 |
| S6 | 0,40 | 5,47 | 14,8 | 1319,0 | 845,0 | 5,2550 | 3,3200 | 0,7270 | 0,7260 | 0,3440 | 0,1960 | 0,0084 | 0,0838 | 0,0008 | 0,5100 | 0,9010 | 338 |
| S7 | 3,80 | 5,43 | 11,0 | 1380,0 | 884,0 | 0,5610 | 0,0615 | 0,7450 | 1,0350 | 0,0740 | 0,0840 | 0,6590 | 0,9590 | 0,0012 | 0,0500 | 1,0680 | 480 |
| S8 | 0,40 | 5,39 | 9,5 | 1350,0 | 849,0 | 0,9630 | 0,7823 | 0,8541 | 1,5220 | 0,1665 | 0,0374 | 0,4410 | 0,1281 | 0,0074 | 0,1630 | 1,1040 | 325 |
| S9 | 15,80 | 5,56 | 12,4 | 816,0 | 523,0 | 2,2370 | 2,6890 | 0,9970 | 10,4300 | 0,5640 | 0,0160 | 0,1360 | 0,1294 | 0,0999 | 0,2250 | n.d | 280 |
| S10 | 0,00 | 5,51 | 12,7 | 1585,0 | 1018,0 | 3,1830 | 0,0800 | 1,0500 | 1,7660 | 1,2000 | 0,0407 | 0,0297 | 0,1950 | 0,0055 | 0,1200 | 1,1920 | 608 |
| S11 | 0,80 | 5,10 | 13,3 | 1866,0 | 1194,0 | 3,5580 | 0,1210 | 1,1040 | 1,3040 | 0,0033 | 0,0610 | 0,0266 | 0,0216 | 0,0040 | 0,0720 | 1,0770 | 592 |
| S12 | 0,00 | 4,79 | 16,5 | 1410,0 | 902,0 | 5,4900 | 0,1060 | 2,2550 | 2,7790 | 0,0043 | 0,0650 | 0,0028 | 0,0017 | 0,0030 | 0,1000 | 0,8080 | 1144 |
| S13 | 2,80 | 5,93 | 16,8 | 1379,0 | 884,0 | 4,8500 | 0,1280 | 2,1030 | 2,5430 | 0,0021 | 0,0640 | 0,0020 | 0,0016 | 0,0022 | 0,0990 | 1,0910 | 640 |
| S14 | 54,10 | 4,96 | 17,4 | 1288,0 | 824,0 | 3,6720 | 0,1380 | 1,0270 | 1,7820 | 0,0000 | 0,0520 | 0,0240 | 0,0000 | 0,0015 | 0,6160 | 0,9807 | 556 |
| S15 | 9,80 | 3,95 | 17,5 | 1158,0 | 741,0 | 3,5110 | 9,2090 | 2,6620 | 2,4610 | 0,0170 | 0,0820 | n.d | 0,0034 | 0,4560 | 0,2670 | 0,8250 | 398 |
| S16 | 47,60 | 3,88 | 16,3 | 1096,0 | 720,0 | 1,4930 | 2,5130 | 1,0470 | 1,3150 | 0,0093 | 0,0430 | 0,0064 | 0,0014 | 0,0340 | 0,0846 | 0,4710 | 261 |
| S17 | 19,20 | 5,11 | 28,9 | 387,0 | 247,0 | 0,1840 | 0,0757 | 1,0700 | 2,4930 | 0,0180 | n.d | n.d | n.d | n.d | 0,3930 | 0,8180 | 472 |

Tabla 5.29. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Olivargas (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 μg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 4,39 | 27,2 | 771,0 | 494,0 | 0,1050 | 3,7200 | 3,7240 | 2,0730 | 0,0530 | 0,0093 | 0,0000 | 0,0095 | 0,0042 | 0,2020 | 0,3032 | 512 |
| S2 | 0,00 | 3,18 | 25,5 | 2200,0 | 1409,0 | 3,0330 | 0,2270 | 4,6730 | 0,0580 | 0,0580 | 0,0101 | 0,0000 | 0,0093 | 0,0035 | 0,2380 | 0,3682 | 992 |
| S3 | 68,60 | 2,96 | 17,5 | 1517,0 | 971,0 | 1,6740 | 1,5516 | 3,3420 | 2,9140 | 0,1160 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0016 | 0,0011 | 1,4320 | 0,2425 | 596 |
| S4 | 56,80 | 4,75 | 16,5 | 753,0 | 482,0 | 0,4270 | 0,0330 | 0,6480 | 4,2640 | 0,0780 | 0,0046 | 0,0100 | 0,0010 | 0,0013 | 0,3920 | 0,3360 | 378 |
| S5 | 66,60 | 5,50 | 14,2 | 548,0 | 351,0 | 0,4030 | 0,0360 | 0,6040 | 0,2830 | 0,2840 | 0,0000 | 0,0006 | n.d | 0,0022 | 0,4040 | 0,6070 | 188 |
| S6 | 0,40 | 5,58 | 15,1 | 1340,0 | 858,0 | 5,2100 | 0,0634 | 2,0360 | 0,8040 | 0,3580 | 0,0990 | 0,0085 | 0,0016 | 0,0017 | 0,2080 | 0,3487 | 520 |
| S7 | 3,80 | 5,13 | 12,0 | 1358,0 | 872,0 | 0,5100 | 0,0567 | 0,6960 | 0,9820 | 0,0760 | 0,0790 | 0,6250 | 0,0005 | 0,0011 | 0,0460 | 1,1760 | 548 |
| S8 | 0,40 | 4,83 | 10,2 | 1339,0 | 865,0 | 0,3210 | 0,0662 | 0,5100 | 0,7230 | 0,4100 | 0,0420 | 0,0732 | 0,0003 | 0,0047 | 0,0937 | n.d | 385 |
| S9 | 15,80 | 5,35 | 13,8 | 806,0 | 516,0 | 0,1780 | 0,0769 | 0,4410 | 0,8060 | 0,5840 | 0,0016 | 0,0036 | 0,0002 | 0,0537 | 0,1240 | n.d | 276 |
| S10 | 0,00 | 5,43 | 12,0 | 1745,0 | 1118,0 | 7,1450 | 0,3990 | 1,4910 | 1,7400 | 0,0013 | 0,0349 | 0,0247 | 0,6680 | 0,0065 | 0,1000 | 1,0910 | 608 |
| S11 | 0,80 | 5,05 | 14,4 | 1936,0 | 1239,0 | 2,9290 | 0,1400 | 2,0940 | 1,4470 | 0,0036 | 0,0780 | 0,0291 | 0,0295 | 0,0047 | 0,1000 | 1,1640 | 676 |
| S12 | 0,00 | 4,67 | 17,0 | 1379,0 | 883,0 | 7,4400 | 0,1300 | 2,0720 | 2,8830 | 0,0360 | 0,0750 | 0,0033 | 0,0038 | 0,0013 | 0,1220 | 0,7490 | 624 |
| S13 | 2,80 | 5,02 | 16,9 | 1365,0 | 880,0 | 6,7410 | 0,1200 | 2,0840 | 2,4410 | 0,0290 | 0,0760 | 0,0030 | 0,0029 | 0,0015 | 0,1020 | 0,6870 | 606 |
| S14 | 54,10 | 5,08 | 17,7 | 1244,0 | 795,0 | 4,2220 | 0,1600 | 1,4270 | 1,7570 | 0,0000 | 0,0650 | 0,0254 | 0,0000 | 0,0008 | 0,6060 | 0,8100 | 596 |
| S15 | 9,80 | 4,14 | 17,4 | 1087,0 | 696,0 | 7,5900 | 9,9790 | 2,5090 | 2,4710 | 0,0180 | 0,0850 | 0,0034 | 0,0285 | 0,0006 | 0,2374 | 0,2450 | 528 |
| S16 | 47,60 | 3,80 | 15,9 | 1025,0 | 621,0 | 3,5470 | 0,2690 | 1,8730 | 2,3690 | 0,0140 | 0,0478 | 0,0000 | 0,0497 | n.d | 0,1970 | 0,5740 | 507 |
| S17 | 19,20 | 5,14 | 28,5 | 347,0 | 222,0 | 0,1770 | 0,0313 | 0,8760 | 2,4620 | 0,0190 | 0,0057 | 0,0000 | 0,1240 | n.d | 0,3870 | 1,0060 | 92 |

Tabla 5.30. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Olivargas (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 μg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 3,10 | 26,0 | 5330,0 | 3420,0 | 9,4400 | 6,8200 | 136,9600 | 57,9200 | 0,6430 | 1,1620 | 1,5190 | 0,0048 | n.d | 0,9890 | 0,6129 | 765 |
| S2 | 0,00 | 2,97 | 23,9 | 5260,0 | 3360,0 | 13,0400 | 7,1800 | 411,0000 | 56,2200 | 0,6290 | 1,1830 | 1,5300 | 0,0053 | n.d | 0,9210 | 0,2921 | 849 |
| S3 | 68,60 | 2,30 | 17,3 | 3530,0 | 2260,0 | 5,4060 | 1,0850 | 224,4000 | 49,0500 | 0,4830 | 0,8030 | 0,2600 | 0,0004 | 0,0070 | 1,7750 | 0,1636 | 1496 |
| S4 | 56,80 | 2,76 | 14,0 | 1620,0 | 1038,0 | 12,2740 | 2,1470 | 42,4000 | 4,5250 | 0,1560 | 0,0215 | 0,0013 | 0,0051 | n.d | 0,4970 | 0,7130 | 940 |
| S5 | 66,60 | 3,14 | 13,6 | 863,0 | 552,0 | 8,6340 | 0,9460 | 13,4950 | 4,0450 | 0,3070 | 0,0505 | 0,0666 | n.d | 0,0001 | 0,9450 | 0,4831 | 472 |
| S6 | 0,40 | 2,63 | 14,6 | 1530,0 | 980,0 | 14,8100 | 1,7990 | 88,2900 | 8,0100 | 0,4440 | 0,2520 | 0,6870 | 0,0216 | 0,0013 | 0,7460 | 0,3380 | 832 |
| S7 | 3,80 | 2,91 | 8,7 | 1667,0 | 1068,0 | 27,6800 | 1,4580 | 340,2880 | 10,0800 | 0,1770 | 0,3260 | 1,9310 | 0,0093 | 0,0016 | 0,0660 | 0,5658 | 920 |
| S8 | 0,40 | 2,79 | 8,9 | 1598,0 | 988,0 | 24,2100 | 1,4420 | 201,0300 | 10,2500 | 0,0335 | 0,0987 | 0,0997 | 0,0069 | 0,0023 | 0,1630 | 0,4860 | 960 |
| S9 | 15,80 | 2,85 | 11,9 | 1737,0 | 1112,0 | 22,3400 | 0,0761 | 182,6300 | 10,6800 | 0,6480 | 0,0009 | 0,0036 | 0,0036 | 0,0001 | 0,1480 | 0,1200 | 1184 |
| S10 | 0,00 | 2,83 | 11,8 | 1997,0 | 1002,8 | 21,0900 | 1,4820 | 126,1600 | 10,9100 | 0,0170 | 0,3376 | 1,4610 | 0,0336 | 0,0022 | 0,1650 | 0,7584 | 752 |
| S11 | 0,80 | 2,78 | 11,9 | 2150,0 | 1380,0 | 21,4300 | 2,0840 | 86,3270 | 3,8800 | 0,0136 | 0,4310 | 0,5910 | 0,0089 | 0,0027 | 0,3220 | 0,7864 | 2304 |
| S12 | 0,00 | 2,64 | 17,2 | 2480,0 | 1588,0 | 20,1200 | 2,1460 | 8,3660 | 15,2100 | 0,0111 | 0,3330 | 0,6280 | 0,0435 | 0,0020 | 0,2900 | 0,1510 | 1512 |
| S13 | 2,80 | 2,86 | 17,8 | 2354,0 | 1392,0 | 20,1000 | 2,0990 | 8,1206 | 12,3900 | 0,0127 | 0,3030 | 0,5590 | 0,0326 | 0,0021 | 0,3150 | 0,2870 | 1426 |
| S14 | 54,10 | 2,50 | 18,3 | 2200,0 | 1406,0 | 16,7100 | 1,8070 | 5,1580 | 15,2800 | 0,0130 | 0,3370 | 0,4500 | 0,0048 | 0,0009 | 0,5200 | 0,4400 | 1320 |
| S15 | 9,80 | 2,52 | 17,1 | 2300,0 | 1467,0 | 10,5200 | 2,6680 | 4,3870 | 7,8970 | 0,0840 | 0,3910 | 0,5350 | 0,0058 | 0,0009 | 0,1880 | 0,6090 | 1480 |
| S16 | 47,60 | 2,50 | 15,7 | 1947,0 | 1246,0 | 12,5500 | 0,7930 | 5,5160 | 12,9100 | 0,1530 | 0,2070 | 0,5080 | 0,0382 | 0,0110 | 0,4840 | 0,6916 | 1310 |
| S17 | 19,20 | 2,41 | 29,3 | 1128,0 | 722,0 | 8,2312 | 3,2530 | 11,3400 | 10,9100 | 0,0930 | 0,4060 | 1,0020 | 0,0286 | 0,0002 | 0,7200 | 0,4630 | 1320 |

Tabla 5.31. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Cueva de la Mora (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 2,80 | 27,1 | 5340,0 | 3430,0 | 23,1200 | 5,8700 | 421,7600 | 57,9200 | 0,6310 | 1,2490 | 1,5220 | 0,0038 | 0,0000 | 0,1190 | 0,4860 | 1504 |
| S2 | 0,00 | 3,05 | 23,8 | 5320,0 | 3410,0 | 19,1600 | 5,7800 | 411,0000 | 56,7200 | 0,6170 | 1,2090 | 1,4760 | 0,0060 | n.d | 0,0550 | 0,5028 | 2256 |
| S3 | 68,60 | 2,38 | 16,9 | 3670,0 | 2350,0 | 6,4790 | 1,0760 | 254,0000 | 30,6000 | 0,4430 | 0,7720 | 0,2290 | n.d | 0,0007 | 2,3660 | 0,4166 | 3264 |
| S4 | 56,80 | 2,47 | 14,3 | 2490,0 | 1596,0 | 21,6000 | 2,6250 | 46,8000 | 7,7550 | 0,2020 | 0,2066 | 0,0289 | 0,0385 | 0,0015 | 0,3690 | 0,8220 | 1448 |
| S5 | 66,60 | 2,78 | 13,7 | 1269,0 | 8110,0 | 18,8900 | 1,5060 | 31,0550 | 6,2420 | 0,3230 | 0,0000 | 0,2170 | 0,0035 | 0,0000 | 0,9260 | 0,5360 | 472 |
| S6 | 0,40 | 2,76 | 13,0 | 2200,0 | 1419,0 | 29,6680 | 5,7200 | 99,8400 | 14,0500 | 0,4820 | 0,3020 | 1,3710 | 0,0466 | 0,0011 | 0,3830 | 0,5340 | 1048 |
| S7 | 3,80 | 2,69 | 7,4 | 2500,0 | 1605,0 | 50,6900 | 2,5480 | 282,8800 | 17,0900 | 0,2470 | 0,5020 | 2,8870 | 0,0201 | 0,0013 | 0,0810 | 0,4370 | 1360 |
| S8 | 0,40 | 2,86 | 7,6 | 2351,0 | 1590,0 | 47,3200 | 3,1090 | 192,0300 | 19,6700 | 0,4800 | 0,0880 | 0,9310 | 0,0100 | 0,0016 | 0,1970 | 0,4590 | 1235 |
| S9 | 15,80 | 2,59 | 10,5 | 2600,0 | 1667,0 | 45,9400 | 4,6090 | 107,3280 | 21,3500 | 0,6000 | 0,0950 | 0,7100 | 0,0089 | 0,0016 | 0,2330 | 0,3020 | 984 |
| S10 | 0,00 | 2,57 | 11,1 | 3150,0 | 2020,0 | 43,6700 | 2,9680 | 222,2400 | 24,7400 | 0,0149 | 0,0550 | 0,8410 | 0,0803 | 0,0028 | 0,2560 | 0,6280 | 2160 |
| S11 | 0,80 | 2,51 | 12,2 | 3440,0 | 2020,0 | 50,6500 | 3,4370 | 6,3330 | 16,6100 | 0,0120 | 0,7230 | 1,2400 | 0,0127 | 0,0009 | 0,4150 | 0,5697 | 2176 |
| S12 | 0,00 | 2,48 | 17,6 | 3660,0 | 2340,0 | 36,9100 | 3,7870 | 8,3810 | 35,7800 | 0,0420 | 0,6380 | 1,2650 | 0,0002 | n.d | 0,3350 | 1,0310 | 2480 |
| S13 | 2,80 | 2,62 | 17,3 | 3325,0 | 2119,0 | 32,2900 | 3,5610 | 7,8640 | 29,9800 | 0,0215 | 0,6610 | 1,2560 | 0,0099 | n.d | 0,3870 | 0,9530 | 1980 |
| S14 | 54,10 | 2,31 | 17,7 | 3160,0 | 2020,0 | 33,8300 | 3,1610 | 5,8500 | 25,1800 | 0,0118 | 0,5080 | 0,9010 | 0,0076 | 0,0010 | 0,5920 | 0,4350 | 1750 |
| S15 | 9,80 | 2,23 | 17,8 | 3540,0 | 2260,0 | 36,7800 | 5,1670 | 5,7760 | 12,5200 | 0,1320 | 0,6140 | 1,1190 | 0,0133 | 0,0012 | 0,2720 | 0,5750 | 1760 |
| S16 | 47,60 | 2,20 | 15,7 | 2980,0 | 1907,0 | 23,3600 | 1,1580 | 5,5960 | 16,8200 | 0,2300 | 0,3920 | 0,9030 | 0,0293 | 0,0093 | 0,6210 | 0,5660 | 1514 |
| S17 | 19,20 | 2,17 | 30,7 | 1737,0 | 1111,0 | 35,1600 | 5,0790 | 11,5900 | 9,9030 | 0,1400 | 0,6880 | 1,0970 | 0,0333 | 0,0024 | 0,8030 | 0,4450 | 1560 |

Tabla 5.32. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cauce del embalse Cueva de la Mora (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 5,92 | 27,4 | 153,2 | 98,0 | 0,0140 | 0,0089 | 2,6100 | 0,1710 | 0,0540 | n.d | n.d | 0,0057 | 0,0151 | 0,1100 | 0,0354 | <20 |
| S2 | 0,00 | 5,78 | 26,5 | 131,1 | 84,0 | 0,0110 | 0,0051 | 0,2860 | 0,1060 | 0,0510 | n.d | n.d | 0,0044 | 0,0339 | 0,2490 | 0,0180 | <20 |
| S3 | 68,60 | 5,45 | 19,1 | 120,3 | 77,1 | 0,0085 | 0,0020 | 0,0364 | 3,1630 | 0,1220 | n.d | n.d | 0,0021 | 0,0016 | 1,5800 | 0,0189 | 33 |
| S4 | 56,80 | 5,88 | 20,3 | 156,9 | 100,5 | 0,0297 | n.d | 0,0172 | 1,1530 | 0,0840 | n.d | n.d | 0,0000 | 0,0025 | 0,1470 | 0,0209 | 44 |
| S5 | 66,60 | 5,74 | 15,1 | 259,0 | 166,1 | 0,2000 | 0,0400 | 0,1370 | 0,8110 | 0,2830 | n.d | n.d | 0,0030 | 0,0092 | 0,8040 | 0,0852 | 54 |
| S6 | 0,40 | 5,58 | 16,6 | 321,0 | 206,0 | 1,0040 | 0,1170 | 0,1350 | 1,4400 | 0,3530 | 0,1670 | 0,0015 | 0,0086 | 0,0010 | 0,2520 | 0,0948 | 69 |
| S7 | 3,80 | 5,48 | 11,3 | 337,0 | 216,0 | 2,4620 | 0,0014 | n.d | 1,6310 | 0,0730 | 0,0890 | 0,6060 | 0,0260 | 0,0003 | 0,0400 | 0,1290 | 36 |
| S8 | 0,40 | 5,49 | 15,7 | 264,0 | 169,2 | 0,2770 | 0,0000 | n.d | 1,5250 | 1,0080 | n.d | 0,0044 | 0,0000 | 0,0005 | 0,0320 | n.d | 61 |
| S9 | 15,80 | 5,52 | 12,6 | 351,0 | 224,0 | 0,0163 | 0,0019 | n.d | 2,7140 | 0,6320 | 0,0003 | 0,0033 | 0,0000 | 0,0012 | 0,1390 | 0,6001 | 76 |
| S10 | 0,00 | 5,47 | 13,9 | 332,0 | 213,0 | 0,6940 | 0,1150 | 0,4130 | 1,7920 | 0,0022 | 0,0130 | 0,0048 | 0,0069 | n.d | 0,0480 | 0,6050 | 79 |
| S11 | 0,80 | 5,64 | 13,5 | 373,0 | 239,0 | 0,8740 | 0,1476 | 0,2220 | 1,9970 | n.d | 0,0490 | 0,0033 | 0,0477 | 0,0005 | 0,0790 | 1,0460 | 81 |
| S12 | 0,00 | 6,17 | 18,1 | 277,0 | 175,4 | 0,3350 | 0,0570 | 0,0163 | 0,7450 | n.d | 0,0290 | 0,0155 | 0,0109 | 0,0011 | 0,0360 | 1,1570 | 34 |
| S13 | 2,80 | 6,20 | 15,4 | 226,0 | 146,5 | 0,0960 | 0,0072 | 0,0104 | 0,7750 | n.d | 0,0640 | 0,0023 | 0,0147 | 0,0129 | 0,1480 | 0,3030 | 42 |
| S14 | 54,10 | 6,10 | 16,5 | 243,0 | 170,3 | 0,0617 | n.d | 0,0127 | 1,3580 | n.d | 0,0320 | 0,0015 | 0,0001 | 0,0000 | 0,5900 | 0,7880 | 48 |
| S15 | 9,80 | 6,04 | 16,8 | 291,0 | 186,1 | 0,0080 | 8,7400 | 0,0270 | 0,8000 | 0,0150 | 0,0480 | 0,0000 | 0,0057 | 0,4850 | 0,2390 | 0,8220 | 49 |
| S16 | 47,60 | 5,49 | 15,4 | 217,0 | 139,1 | 2,2840 | 6,6680 | 0,1300 | 0,7850 | 0,0460 | 0,0023 | 0,0071 | 0,0198 | 0,0041 | 0,1830 | 0,7960 | 40 |
| S17 | 19,20 | 5,80 | 29,3 | 101,8 | 65,3 | 0,8390 | 0,0775 | 0,5390 | 1,5450 | 0,0180 | 0,0012 | n.d | 0,0500 | n.d | 0,3900 | 0,1830 | 41 |

Tabla 5.33. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Puerto León (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 3,05 | 25,4 | 7520,0 | 4820,0 | 420,0000 | 7,9000 | 35,2400 | 58,8600 | 0,1200 | 2,0360 | 2,6700 | 0,0106 | n.d | 0,1380 | 0,0841 | 3808 |
| S2 | 0,00 | 2,65 | 26,3 | 7430,0 | 4760,0 | 327,8800 | 8,4600 | 37,7840 | 50,8600 | 0,1190 | 1,9670 | 2,6410 | 0,0064 | n.d | 0,2940 | 0,0570 | 2952 |
| S3 | 68,60 | 2,36 | 20,0 | 7540,0 | 4820,0 | 122,6000 | 2,7530 | 13,5200 | 33,6500 | 0,1890 | 2,1660 | 1,8770 | 0,6440 | 0,0021 | 2,0300 | 0,2490 | 5120 |
| S4 | 56,80 | 2,42 | 14,6 | 6980,0 | 4470,0 | 309,9000 | 8,0110 | 26,4200 | 50,1000 | 0,1390 | 0,4480 | 3,0380 | 0,3531 | n.d | 0,4900 | 0,6410 | 1520 |
| S5 | 66,60 | 2,49 | 13,1 | 7380,0 | 4720,0 | 376,0000 | 9,6280 | 31,8200 | 29,7650 | 0,3060 | 0,2355 | 1,6000 | 0,0117 | 0,0011 | 0,4360 | 0,2840 | 2320 |
| S6 | 0,40 | 2,35 | 11,5 | 5620,0 | 3610,0 | 358,8000 | 10,9200 | 32,2900 | 34,3200 | 0,4120 | 1,2010 | 5,6980 | 0,3518 | n.d | 0,7470 | n.d | 2224 |
| S7 | 3,80 | 2,48 | 7,3 | 5650,0 | 3620,0 | 191,9400 | 10,7700 | 29,1520 | 44,0100 | 0,1140 | 1,1340 | 6,9840 | 0,8321 | 0,0063 | 0,2000 | n.d | 2496 |
| S8 | 0,40 | 2,49 | 7,4 | 5770,0 | 3700,0 | 326,8200 | 10,9500 | 13,4700 | 29,8730 | 0,1310 | 1,8220 | 10,8040 | 0,9441 | 0,0011 | 0,5210 | n.d | 5056 |
| S9 | 15,80 | 2,46 | 10,0 | 6450,0 | 4130,0 | 328,4800 | 18,9400 | 22,2500 | 64,8000 | 0,1130 | 0,4690 | 3,7480 | 0,7847 | 0,0060 | 0,4680 | n.d | 2736 |
| S10 | 0,00 | 2,53 | 9,5 | 5590,0 | 3590,0 | 363,1200 | 12,4700 | 55,6100 | 34,2240 | 0,0099 | 0,2310 | 3,7990 | 0,4197 | 0,0020 | 0,4610 | 0,2026 | 3520 |
| S11 | 0,80 | 2,57 | 10,1 | 5120,0 | 3280,0 | 224,0000 | 11,1400 | 6,4920 | 20,8100 | 0,0165 | 1,3820 | 1,9540 | 0,2469 | 0,0004 | 0,6800 | 0,1650 | 2000 |
| S12 | 0,00 | 2,42 | 13,0 | 6620,0 | 4240,0 | 314,9400 | 3,0620 | 4,5500 | 35,6800 | 0,0097 | 1,4130 | 4,0990 | 0,0459 | 0,0049 | 0,4230 | 0,2140 | 2560 |
| S13 | 2,80 | 2,42 | 17,8 | 6750,0 | 4320,0 | 525,6000 | 9,2650 | 8,0280 | 32,2600 | 0,0162 | 1,0650 | 3,7210 | 0,3150 | 0,0030 | 0,6040 | n.d | 2260 |
| S14 | 54,10 | 2,40 | 15,7 | 6610,0 | 4230,0 | 253,2000 | 10,2700 | 5,5800 | 32,2800 | 0,0164 | 1,4940 | 3,3570 | 0,2453 | 0,0000 | 0,6570 | 0,0660 | 5216 |
| S15 | 9,80 | 2,35 | 14,0 | 6500,0 | 4160,0 | 288,3000 | 11,0400 | 5,5487 | 28,6400 | 0,0410 | 1,0810 | 1,6880 | 0,1521 | 0,0397 | 0,5640 | 0,2570 | 6200 |
| S16 | 47,60 | 2,31 | 18,8 | 6380,0 | 4080,0 | 348,0000 | 0,6580 | 4,5980 | 16,9500 | 0,0830 | 1,4850 | 0,4170 | 0,2700 | 0,0268 | 0,3070 | 0,0546 | 1110 |
| S17 | 19,20 | 2,38 | 25,8 | 2320,0 | 1484,0 | 289,3200 | 7,6730 | 9,3936 | 11,4200 | 0,0360 | 1,0740 | 2,0590 | 0,2140 | 0,0028 | 1,0060 | 0,1970 | 1370 |

Tabla 5.34. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Aguas Ácidas (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 7,32 | 30,9 | 670,0 | 426,0 | 0,0054 | 0,0136 | 0,0014 | 5,3940 | 0,0500 | 0,0007 | 0,0000 | 0,0057 | 0,0057 | 0,0830 | 0,1463 | 47 |
| S2 | 0,00 | 7,58 | 27,3 | 667,0 | 427,0 | 3,2404 | 0,1242 | 0,1651 | 0,0560 | 0,0490 | 0,0016 | 0,0000 | 0,0053 | 0,0059 | 0,0890 | 0,1977 | 53 |
| S3 | 68,60 | 7,35 | 23,2 | 687,0 | 440,0 | 0,2116 | n.d | 0,0841 | 1,2260 | 0,1210 | 0,0004 | 0,0000 | 0,0311 | 0,0013 | 1,5950 | 0,1489 | 67 |
| S4 | 56,80 | 7,10 | 20,7 | 617,0 | 395,0 | 0,0148 | 0,0050 | 0,0009 | 0,0301 | 0,0750 | n.d | 0,0001 | 0,0005 | 0,0023 | 0,2860 | 0,5330 | 83 |
| S5 | 66,60 | 5,76 | 17,8 | 367,0 | 236,0 | 0,0690 | 0,0283 | 0,0000 | 0,0100 | 0,2720 | 0,0004 | 0,0000 | 0,0006 | 0,0017 | 0,3210 | 0,0370 | 63 |
| S6 | 0,40 | 6,72 | 18,3 | 502,0 | 321,0 | 0,0860 | 0,0290 | 0,0090 | 0,0420 | 0,3470 | 0,1390 | 0,0000 | 0,0001 | 0,0008 | 0,7040 | 0,0576 | 90 |
| S7 | 3,80 | 6,29 | 11,2 | 524,0 | 336,0 | 0,4390 | n.d | 0,2313 | 0,0124 | 0,0770 | 0,0590 | 0,3790 | 0,0090 | 0,0021 | 0,0420 | 0,1634 | 85 |
| S8 | 0,40 | 5,78 | 15,2 | 380,0 | 243,0 | 0,0621 | n.d | 0,7980 | 0,0210 | 0,0930 | 0,0500 | 0,1950 | 0,0047 | 0,0015 | 0,0520 | 0,0915 | 59 |
| S9 | 15,80 | 6,90 | 13,4 | 623,0 | 399,0 | 0,0000 | 0,0910 | 0,0058 | 0,7183 | 0,3960 | 0,0009 | 0,0029 | 0,0019 | 0,0008 | 0,0730 | 0,5235 | 99 |
| S10 | 0,00 | 6,96 | 14,4 | 609,0 | 390,0 | 0,2581 | 0,0030 | 0,0000 | 0,0388 | n.d | n.d | 0,0013 | 0,0034 | 0,0002 | 0,1490 | 0,0844 | 76 |
| S11 | 0,80 | 6,02 | 18,2 | 466,0 | 299,0 | 0,1616 | 0,0125 | 0,0090 | 0,0460 | n.d | 0,0700 | 0,0000 | n.d | 0,0012 | 0,1790 | 0,2544 | 46 |
| S12 | 0,00 | 7,26 | 20,5 | 714,0 | 458,0 | 0,1738 | 0,4580 | 0,0153 | 0,0018 | n.d | 0,0410 | 0,0028 | n.d | 0,0005 | 0,0410 | 0,0279 | 90 |
| S13 | 2,80 | 6,65 | 23,2 | 750,0 | 480,0 | 0,1682 | 0,3960 | 0,0130 | 0,0027 | n.d | 0,0630 | 0,0019 | n.d | 0,0004 | 0,0250 | 0,0191 | 84 |
| S14 | 54,10 | 6,32 | 21,6 | 598,0 | 463,0 | 0,2140 | 0,0048 | 0,0478 | 0,0099 | 0,0063 | 0,0740 | 0,0005 | 0,0099 | 0,0078 | 0,0478 | 0,0780 | 76 |
| S15 | 9,80 | 6,75 | 17,0 | 628,0 | 402,0 | 0,3280 | 0,0049 | 0,0590 | 0,0860 | 0,0160 | 0,0960 | 0,0000 | 0,0025 | 0,0530 | 0,0978 | 0,4050 | 66 |
| S16 | 47,60 | 6,05 | 21,3 | 671,0 | 430,0 | 0,5420 | 0,2350 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0430 | 0,0023 | 0,0055 | 0,0376 | 0,0050 | 0,2290 | 0,2960 | 63 |
| S17 | 19,20 | 6,95 | 31,1 | 311,0 | 199,3 | 0,1070 | 0,0046 | 0,0080 | 1,0440 | 0,0170 | n.d | 0,0000 | 1,3810 | 0,0000 | 0,3360 | 0,1345 | 62 |

Tabla 5.35. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Herrerías (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 μg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 6,51 | 31,6 | 162,5 | 104,3 | 0,1037 | 0,0136 | n.d | 0,0890 | 0,0490 | 0,0008 | n.d | 0,0049 | 0,0061 | 0,1770 | 0,9699 | <20 |
| S2 | 0,00 | 5,83 | 27,9 | 162,2 | 103,1 | 0,1029 | n.d | 0,0042 | 0,0220 | 0,0500 | 0,0006 | n.d | 0,0052 | 0,0079 | 0,3020 | 0,9958 | 25 |
| S3 | 68,60 | 5,66 | 22,5 | 147,5 | 94,4 | 0,0082 | 0,0012 | 0,0341 | 0,8790 | 0,1230 | n.d | n.d | 0,0200 | 0,0037 | 1,5520 | 0,0519 | <20 |
| S4 | 56,80 | 5,77 | 19,8 | 139,0 | 89,7 | 0,0044 | n.d | 0,0004 | 0,3675 | 0,0780 | n.d | n.d | n.d | 0,0018 | 0,2540 | 0,4130 | <20 |
| S5 | 66,60 | 5,85 | 17,6 | 251,0 | 160,5 | 0,0399 | 0,0001 | n.d | 0,0049 | 0,2660 | n.d | n.d | n.d | 0,0025 | 0,5150 | n.d | <20 |
| S6 | 0,40 | 6,95 | 16,4 | 190,1 | 121,8 | 0,0643 | 0,0180 | 0,7270 | 0,0714 | 0,3440 | 0,1560 | 0,0770 | n.d | 0,0017 | 0,3170 | n.d | <20 |
| S7 | 3,80 | 6,45 | 11,4 | 188,4 | 120,6 | 0,3730 | n.d | 0,0000 | 0,0153 | 0,0720 | 0,0600 | 0,3340 | 0,0020 | 0,0011 | 0,0350 | n.d | <20 |
| S8 | 0,40 | 5,60 | 13,4 | 186,1 | 118,9 | 0,0632 | n.d | 1,0270 | 0,0214 | 0,0820 | 0,0310 | 0,1620 | 0,0027 | 0,0013 | 0,0520 | 0,0881 | <20 |
| S9 | 15,80 | 5,77 | 11,0 | 183,6 | 117,6 | 0,0598 | 0,1390 | 0,1960 | 0,0154 | 0,0140 | n.d | 0,0030 | n.d | 0,0010 | 0,0750 | 0,1921 | 21 |
| S10 | 0,00 | 5,70 | 13,4 | 190,7 | 122,1 | 0,0510 | 0,0036 | 0,0200 | 0,0378 | n.d | 0,0006 | 0,0020 | 0,0005 | 0,0000 | 0,1430 | 0,2180 | 24 |
| S11 | 0,80 | 5,59 | 15,7 | 188,6 | 120,7 | 0,6460 | 0,0034 | 0,0690 | 0,0050 | n.d | 0,0940 | n.d | n.d | 0,0006 | 0,3280 | 0,8280 | <20 |
| S12 | 0,00 | 7,01 | 18,0 | 223,0 | 143,5 | 0,1131 | 0,5530 | 0,0168 | 0,0140 | n.d | 0,0220 | 0,0018 | n.d | n.d | 0,0440 | 0,1601 | <20 |
| S13 | 2,80 | 6,17 | 20,8 | 232,0 | 148,3 | 0,0276 | 0,0076 | 0,0143 | 0,0360 | n.d | 0,0600 | 0,0038 | n.d | n.d | 0,1980 | 0,2240 | <20 |
| S14 | 54,10 | 6,23 | 19,2 | 251,0 | 145,0 | 0,0678 | 0,0065 | 0,0297 | 0,0214 | 0,0005 | 0,7980 | 0,0030 | 0,0008 | n.d | 0,1360 | 0,2270 | 26 |
| S15 | 9,80 | 5,65 | 15,7 | 197,9 | 126,7 | 0,0380 | 0,0037 | 0,0510 | 0,0530 | 0,0150 | 0,0910 | 0,0018 | 0,0011 | n.d | 0,1250 | 0,2600 | 34 |
| S16 | 47,60 | 5,48 | 19,3 | 193,9 | 124,1 | 0,2520 | 0,1020 | 0,1710 | 0,0884 | 0,0440 | 0,0024 | 0,0053 | 0,0097 | 0,0059 | 0,2000 | 0,2130 | 38 |
| S17 | 19,20 | 5,61 | 30,0 | 103,0 | 66,2 | 0,1520 | 0,0106 | 0,0110 | 1,2150 | 0,0170 | n.d | n.d | n.d | n.d | 0,3190 | 0,4240 | 20 |

Tabla 5.36. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Dique I (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 μg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 6,76 | 31,6 | 285,0 | 182,8 | 0,7618 | 0,0041 | 0,7579 | 0,0480 | 0,0500 | 0,0005 | n.d | 0,0048 | n.d | 0,2180 | 0,0365 | <20 |
| S2 | 0,00 | 7,30 | 28,3 | 181,8 | 117,0 | 0,4185 | 0,0015 | 0,2608 | 0,0060 | 0,0500 | 0,0002 | n.d | 0,0049 | n.d | 0,1730 | 0,0531 | <20 |
| S3 | 68,60 | 5,72 | 23,4 | 191,8 | 122,8 | 0,1980 | 0,0190 | 0,8675 | 4,6100 | 0,1210 | 0,0061 | n.d | 0,0092 | 0,0010 | 1,1840 | 0,2659 | <20 |
| S4 | 56,80 | 7,01 | 19,0 | 218,0 | 139,5 | 0,0103 | n.d | 0,0175 | 2,2140 | 0,0440 | n.d | n.d | n.d | 0,0023 | 0,1430 | 0,4130 | 20 |
| S5 | 66,60 | 5,79 | 16,7 | 248,0 | 159,0 | 0,1235 | 0,1720 | n.d | 0,0210 | 0,2820 | n.d | n.d | 0,0068 | 0,0030 | 0,6790 | 0,2840 | 26 |
| S6 | 0,40 | 5,79 | 16,6 | 259,0 | 165,6 | 0,0317 | 0,0150 | 0,1910 | 0,0678 | 0,3400 | 0,1930 | n.d | 0,0006 | 0,0025 | 0,5750 | 0,0000 | 65 |
| S7 | 3,80 | 5,84 | 12,1 | 250,0 | 160,1 | 0,3560 | 0,0000 | 0,0680 | 0,0013 | 0,0720 | 0,0580 | 0,0300 | 0,0045 | 0,0017 | 0,0340 | 0,0000 | <20 |
| S8 | 0,40 | 5,69 | 14,4 | 243,0 | 155,0 | 0,0565 | 0,0000 | 0,9250 | 0,0110 | 0,0850 | 0,0390 | 0,1550 | 0,0077 | 0,0025 | 0,0600 | 0,0060 | 29 |
| S9 | 15,80 | 5,67 | 11,9 | 250,0 | 160,3 | 0,0594 | 0,0480 | n.d | 0,0055 | 0,4330 | n.d | 0,0031 | n.d | 0,0014 | 0,0800 | 0,6480 | 30 |
| S10 | 0,00 | 6,93 | 16,5 | 249,0 | 159,5 | 0,2623 | 0,0100 | 0,0200 | 0,0378 | n.d | 0,0131 | 0,0025 | 0,0013 | n.d | 0,1390 | 0,2340 | 38 |
| S11 | 0,80 | 6,01 | 18,9 | 252,0 | 161,7 | 0,2050 | 0,0159 | 0,0130 | 0,0250 | n.d | 0,0960 | 0,0000 | 0,0000 | 0,8090 | 0,2980 | 0,7300 | 24 |
| S12 | 0,00 | 6,64 | 18,8 | 364,0 | 234,0 | 0,1132 | 0,5990 | 0,0121 | 0,0040 | n.d | 0,0290 | 0,0013 | n.d | n.d | 0,0530 | 0,1480 | 35 |
| S13 | 2,80 | 6,87 | 20,5 | 288,0 | 184,2 | 0,0970 | 0,0074 | 0,0125 | 0,0430 | n.d | 0,0630 | 0,0031 | 0,0018 | 0,0037 | 0,0860 | 0,1640 | 31 |
| S14 | 54,10 | 6,69 | 19,3 | 296,0 | 226,0 | 0,0147 | 0,0012 | 0,0231 | 0,0324 | 0,0035 | 0,0573 | 0,0008 | 0,0047 | 0,0042 | 0,0697 | 0,1670 | 34 |
| S15 | 9,80 | 5,86 | 16,2 | 273,0 | 174,6 | 0,0290 | n.d | 0,0660 | 0,0678 | 0,0150 | 0,0960 | n.d | 0,0027 | 0,5730 | 0,0796 | 0,2040 | 38 |
| S16 | 47,60 | 5,65 | 21,3 | 271,0 | 173,3 | 0,2240 | 0,0790 | 0,0051 | 0,1011 | 0,0440 | 0,0081 | 0,0088 | 0,0132 | 0,0017 | 0,2040 | 0,4620 | 33 |
| S17 | 19,20 | 6,24 | 32,1 | 142,1 | 90,7 | 0,1322 | 0,0062 | 0,0050 | 1,0970 | 0,0170 | 0,0000 | n.d | n.d | n.d | 0,3040 | 0,1760 | 31 |

Tabla 5.37. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Dique II (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Cerro (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------|------|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| S1 | 0,00 | 5,69 | 28,0 | 180,2 | 115,3 | 0,5420 | 0,0028 | 0,0005 | 0,0110 | 0,0490 | n.d | n.d | 0,0019 | 0,0005 | 0,1900 | 0,7986 | 85 |
| S2 | 0,00 | 6,06 | 25,0 | 184,1 | 118,0 | 0,0092 | 0,0027 | 2,7196 | 0,0440 | 0,0480 | n.d | n.d | 0,0072 | 0,0002 | 0,1970 | 0,9360 | 83 |
| S3 | 68,60 | 5,56 | 18,8 | 163,6 | 104,7 | 0,9814 | 0,0000 | 0,0334 | 0,0530 | 0,1040 | 0,0005 | n.d | 0,0015 | 0,0033 | 1,5760 | 0,0306 | 72 |
| S4 | 56,80 | 5,60 | 17,2 | 159,0 | 101,8 | 0,0076 | 0,0000 | 0,0324 | 0,5800 | 0,0910 | n.d | 0,0004 | 0,0001 | 0,0023 | 0,2140 | 0,2450 | 64 |
| S5 | 66,60 | 5,55 | 13,7 | 191,9 | 122,8 | 0,0830 | 0,0020 | 0,1065 | 0,1020 | 0,2690 | n.d | n.d | n.d | 0,0011 | 1,8010 | 0,0750 | 72 |
| S6 | 0,40 | 5,87 | 14,6 | 210,0 | 134,4 | 0,1170 | 0,0640 | 0,1390 | 0,4540 | 0,3500 | 0,1180 | 0,1850 | 0,0007 | 0,0009 | 0,8140 | n.d | 77 |
| S7 | 3,80 | 5,73 | 12,8 | 187,9 | 120,4 | 0,3010 | 0,0000 | 0,0900 | 0,6080 | 0,0730 | 0,0530 | 0,2960 | 0,0043 | 0,0001 | 0,0380 | n.d | 71 |
| S8 | 0,40 | 5,66 | 14,2 | 185,1 | 118,5 | 0,1337 | 0,0040 | 0,1522 | 0,6680 | 0,2810 | 0,0055 | 0,0050 | n.d | n.d | 0,0440 | 0,1340 | 64 |
| S9 | 15,80 | 5,93 | 11,9 | 190,1 | 121,9 | 0,0650 | 0,0650 | 0,0579 | 0,0167 | 0,3230 | n.d | 0,0034 | n.d | 0,0005 | 0,0580 | 0,0168 | 66 |
| S10 | 0,00 | 5,78 | 13,3 | 188,4 | 121,2 | 0,2730 | 0,0348 | 0,0625 | 0,3990 | n.d | 0,0043 | 0,0012 | 0,0008 | n.d | 0,1170 | 0,0340 | 79 |
| S11 | 0,80 | 5,87 | 13,5 | 187,8 | 120,3 | 0,3400 | 0,0011 | 0,1650 | 0,1100 | n.d | 0,0760 | 0,0000 | n.d | 0,2640 | 0,2030 | 0,4984 | 76 |
| S12 | 0,00 | 6,40 | 18,0 | 246,0 | 157,2 | 0,0970 | 0,0025 | 0,0941 | 0,2470 | n.d | 0,0478 | 0,0029 | n.d | 0,0340 | 0,2610 | 0,3970 | 83 |
| S13 | 2,80 | 6,37 | 16,4 | 238,0 | 153,8 | 0,0589 | 0,0054 | 0,0105 | 0,3010 | n.d | 0,0680 | 0,0047 | 0,0004 | 0,0015 | 0,1820 | 0,5000 | 74 |
| S14 | 54,10 | 6,16 | 17,2 | 229,0 | 146,6 | 0,0734 | 0,0128 | 0,0083 | 0,2920 | n.d | 0,0290 | 0,0006 | n.d | n.d | 0,4190 | 0,2044 | 67 |
| S15 | 9,80 | 6,17 | 17,0 | 284,0 | 181,8 | 0,0865 | 0,2320 | 0,0390 | 0,2860 | 0,0140 | 0,0740 | n.d | 0,0008 | n.d | 0,2360 | 0,2460 | 69 |
| S16 | 47,60 | 5,56 | 16,3 | 189,9 | 121,6 | 0,1980 | 0,0280 | 0,0170 | 0,1039 | 0,0430 | 0,0017 | 0,0038 | 0,0021 | 0,0042 | 0,2080 | 0,2048 | 62 |
| S17 | 19,20 | 5,49 | 28,4 | 175,2 | 115,0 | 0,0960 | 0,1670 | 0,0267 | 0,1873 | 0,0874 | 0,0091 | 0,0025 | 0,0017 | 0,0030 | 0,2154 | 0,2310 | 65 |

Tabla.5.38. Parámetros físico-químicos medidos en el punto cola del embalse Garnacha (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; Precipitación Cerro: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Cerro).

| Semana | Precipitación Campillo (mm) | pH | T ^a (°C) | Cond (μS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|--------|--------------------------------|------|---------------------|-----------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---|
| S1 | 0,00 | 2,78 | 25,3 | 2720,0 | 1740,0 | 28,5800 | 4,7000 | 10,6400 | 10,3300 | 0,1030 | 0,1200 | 0,8390 | 0,0054 | n.d | 0,0610 | 0,1063 | 936 |
| S2 | 0,00 | 2,70 | 27,7 | 2700,0 | 1728,0 | 24,8000 | 4,7000 | 11,6000 | 10,7900 | 0,1010 | 0,1220 | 0,8600 | 0,0072 | n.d | 0,2150 | 0,1060 | 1872 |
| S3 | 104,00 | 2,38 | 18,1 | 2700,0 | 1726,0 | 8,2090 | 1,6190 | 11,1200 | 8,8100 | 0,1620 | 0,1200 | 0,0990 | 0,0175 | 0,0030 | 1,5680 | 0,5723 | 2960 |
| S4 | 57,60 | 2,52 | 16,8 | 2670,0 | 1683,0 | 38,1900 | 7,1540 | 8,1800 | 1,3300 | 0,1280 | 4,9000 | 0,0073 | 0,0015 | n.d | 0,1620 | 0,3420 | 1400 |
| S5 | 66,60 | 2,56 | 11,8 | 2630,0 | 1681,0 | 20,1600 | 9,5980 | 9,7850 | 9,3750 | 0,3060 | 0,0150 | 0,4790 | 0,0094 | 0,0026 | 0,7360 | 0,4460 | 1112 |
| S6 | 1,00 | 2,58 | 14,6 | 2620,0 | 1685,0 | 17,0600 | 9,1360 | 12,4650 | 11,2000 | 0,3700 | 0,1720 | 2,4610 | 0,0134 | 0,0032 | 0,6150 | 0,3790 | 1216 |
| S7 | 6,80 | 2,64 | 13,1 | 2660,0 | 1706,0 | 48,2000 | 0,6770 | 14,5840 | 10,7700 | 0,1080 | 0,1960 | 3,4090 | 0,0233 | 0,0033 | 0,0920 | 0,4974 | 1336 |
| S8 | 0,40 | 2,59 | 12,3 | 2643,0 | 1698,0 | 42,6400 | 1,7520 | 13,9860 | 10,5480 | 0,2320 | 0,0847 | 2,2360 | 0,0315 | 0,0020 | 0,1520 | 0,4760 | 1489 |
| S9 | 14,20 | 2,80 | 13,7 | 2570,0 | 1640,0 | 35,2400 | 3,8090 | 14,9120 | 11,6900 | 0,3770 | 0,0759 | 1,1490 | 0,0478 | 0,0025 | 0,2410 | 0,5274 | 1536 |
| S10 | 5,00 | 2,70 | 14,2 | 2600,0 | 1669,0 | 58,7800 | 14,0900 | 17,1800 | 14,4700 | 0,0162 | 0,2510 | 1,4330 | 0,0053 | 0,0056 | 0,3680 | 0,6299 | 1136 |
| S11 | 0,00 | 2,71 | 16,5 | 2580,0 | 1653,0 | 36,9100 | 9,6820 | 5,9430 | 13,9000 | 0,0159 | 0,2610 | 1,2850 | 0,0171 | 0,0023 | 0,4260 | 0,5696 | 1384 |
| S12 | 0,80 | 3,00 | 15,3 | 2740,0 | 1753,0 | 39,7500 | 9,5610 | 6,0370 | 12,5800 | 0,0094 | 0,2280 | 1,4060 | n.d | 0,0029 | 0,2960 | 0,5532 | 1512 |
| S13 | 17,60 | 2,90 | 16,1 | 2698,0 | 1695,0 | 38,7900 | 9,4870 | 5,8710 | 13,0100 | 0,0079 | 0,2430 | 1,3980 | n.d | 0,0025 | 0,3620 | 0,5469 | 1495 |
| S14 | 40,20 | 2,70 | 16,5 | 2523,0 | 1642,0 | 39,0100 | 8,2340 | 5,1270 | 12,5000 | 0,0096 | 0,2570 | 1,3560 | 0,0013 | 0,0025 | 0,3140 | 0,4780 | 1502 |
| S15 | 24,20 | 2,50 | 16,7 | 2590,0 | 1658,0 | 38,4400 | 7,0280 | 4,9580 | 8,9870 | 0,0450 | 0,2920 | 1,2600 | 0,0106 | 0,0031 | 0,2770 | 0,4630 | 1032 |
| S16 | 51,80 | 2,56 | 15,8 | 2600,0 | 1661,0 | 32,2800 | 1,9440 | 5,0330 | 11,5000 | 0,1040 | 0,0860 | 1,1840 | 0,0277 | 0,0230 | 0,4310 | 0,5560 | 1002 |
| S17 | 31,80 | 2,48 | 28,6 | 2530,0 | 1237,0 | 35,1470 | 4,1670 | 4,1256 | 10,2140 | 0,1120 | 0,1679 | 1,0340 | 0,0317 | 0,0094 | 0,2687 | 0,4169 | 1147 |

Tabla 5.39. Parámetros físico-químicos medidos en el embalse Gossan (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 μg/L; Precipitación Campillo: datos de precipitación acumulada tomados de la estación meteorológica El Campillo).

5.2.1.2. Muestreo de agua en profundidad llevado a cabo, de manera puntual, en el la presa del embalse El Sancho (Masa 2)

La tabla 5.40 muestra los valores que toman las variables analizadas derivadas del muestreo de agua en profundidad llevado a cabo de manera puntual en Octubre del primer año hidrológico (2011) en el embalse El Sancho.

| Muestra | Profundidad (m) | Tª (°C) | pH | Cond (µS/cm) | TSD (mg/L) | OD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Pb (mg/L) | Al (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|---------|-----------------|---------|-----|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| MO | 0 | 25,7 | 3,6 | 472,0 | 302,0 | 6,16 | 0,8160 | 0,7860 | 2,3750 | 1,5160 | 0,1310 | 0,0104 | n.d | n.d | 0,0017 | 0,7780 | 0,0395 | 190 |
| M1 | 1 | 25,7 | 3,5 | 465,0 | 298,0 | 5,94 | 0,7060 | 0,6920 | 2,4670 | 1,6770 | 0,1270 | 0,0105 | n.d | n.d | 0,0019 | 0,6570 | 0,0278 | 199 |
| M2 | 2 | 25,8 | 3,5 | 458,0 | 293,0 | 6,01 | 0,7830 | 0,8070 | 2,3960 | 1,5930 | 0,1440 | 0,0099 | n.d | n.d | 0,0016 | 0,2750 | 0,0544 | 197 |
| M3 | 3 | 25,8 | 3,6 | 459,0 | 293,0 | 5,78 | 0,7230 | 0,7410 | 2,4840 | 1,5590 | 0,1220 | 0,0100 | n.d | n.d | 0,0023 | 0,8040 | 0,0435 | 188 |
| M4 | 4 | 25,8 | 3,6 | 445,0 | 285,0 | 5,58 | 0,6070 | 0,6890 | 2,4630 | 1,5710 | 0,1380 | 0,0101 | n.d | n.d | 0,0031 | 0,8710 | 0,0637 | 171 |
| M5 | 5 | 25,8 | 3,6 | 443,0 | 284,0 | 5,39 | 0,5640 | 0,6270 | 2,4450 | 1,5170 | 0,1420 | 0,0105 | n.d | n.d | 0,0032 | 0,7800 | 0,0502 | 172 |
| M6 | 6 | 25,8 | 3,5 | 456,0 | 292,0 | 5,13 | 0,6100 | 0,6200 | 2,4350 | 1,5230 | 0,1420 | 0,0105 | n.d | n.d | 0,0026 | 0,6360 | 0,0502 | 176 |
| M7 | 7 | 25,7 | 3,6 | 449,0 | 287,0 | 4,72 | 0,6790 | 0,6180 | 2,4290 | 1,5310 | 0,1430 | 0,0104 | n.d | n.d | 0,0019 | 0,5660 | 0,0502 | 180 |
| M8 | 8 | 25,7 | 3,6 | 450,0 | 288,0 | 4,89 | 0,7900 | 0,6630 | 2,5400 | 1,5820 | 0,1460 | 0,0105 | n.d | n.d | 0,0023 | 0,5740 | 0,0495 | 181 |
| M9 | 9 | 25,6 | 3,5 | 454,0 | 291,0 | 4,99 | 0,6510 | 0,7100 | 2,5950 | 1,5190 | 0,1380 | 0,0104 | n.d | n.d | 0,0030 | 0,7580 | 0,0596 | 178 |
| M10 | 10 | 25,7 | 3,5 | 444,0 | 284,0 | 4,81 | 0,5400 | 0,5180 | 2,5450 | 1,4960 | 0,1470 | 0,0104 | n.d | n.d | 0,0032 | 1,2140 | 0,0653 | 185 |
| M11 | 11 | 25,6 | 3,6 | 447,0 | 286,0 | 5,45 | 0,6430 | 0,6100 | 2,6290 | 1,5220 | 0,1400 | 0,0105 | n.d | n.d | 0,0020 | 1,0630 | 0,0641 | 187 |
| M12 | 12 | 25,7 | 3,6 | 443,0 | 284,0 | 4,86 | 0,7480 | 0,6110 | 2,6780 | 1,5770 | 0,1310 | 0,0105 | n.d | n.d | 0,0031 | 0,9680 | 0,1042 | 198 |
| M13 | 13 | 25,6 | 3,6 | 451,0 | 289,0 | 5,19 | 0,6140 | 0,6140 | 2,7230 | 1,5190 | 0,1350 | 0,0101 | n.d | n.d | 0,0031 | 0,9260 | 0,0117 | 198 |
| M14 | 14 | 25,7 | 3,6 | 458,0 | 293,0 | 5,28 | 0,6700 | 0,5850 | 2,7220 | 1,5900 | 0,1180 | 0,0103 | n.d | n.d | 0,0018 | 1,0650 | 0,1676 | 196 |
| M15 | 15 | 25,3 | 3,7 | 445,0 | 285,0 | 4,50 | 0,5910 | 0,5750 | 2,6390 | 1,4890 | 0,1260 | 0,0105 | n.d | n.d | 0,0031 | 0,9460 | 0,1615 | 180 |
| M16 | 16 | 24,9 | 3,7 | 430,0 | 275,0 | 3,95 | 0,6390 | 0,5260 | 2,4260 | 1,4400 | 0,1190 | 0,0102 | n.d | n.d | 0,0015 | 0,9760 | 0,0987 | 172 |
| M17 | 17 | 23,3 | 3,8 | 402,0 | 257,0 | 0,80 | 0,6430 | 0,4470 | 2,1390 | 1,2720 | 0,1220 | 0,0104 | n.d | n.d | 0,0018 | 1,1060 | 0,1183 | 171 |
| M18 | 18 | 21,2 | 4,3 | 401,0 | 257,0 | 0,93 | 0,8480 | 0,6080 | 2,1040 | 1,0790 | 0,1290 | 0,0105 | n.d | n.d | 0,0026 | 1,3600 | 0,1226 | 170 |
| M19 | 19 | 19,0 | 4,5 | 419,0 | 268,0 | 0,98 | 0,6400 | 0,4180 | 2,0640 | 1,3580 | 0,1310 | 0,0104 | n.d | n.d | 0,0015 | 1,2620 | 0,1356 | 181 |
| M20 | 20 | 17,7 | 4,5 | 425,0 | 272,0 | 0,85 | 1,1600 | 0,6240 | 1,4930 | 1,3390 | 0,1310 | 0,0104 | n.d | n.d | 0,0017 | 1,4430 | 0,1301 | 171 |
| M21 | 21 | 17,1 | 4,7 | 425,0 | 272,0 | 0,68 | 0,9160 | 0,6690 | 2,0140 | 1,4650 | 0,1230 | 0,0103 | n.d | n.d | 0,0021 | 1,6470 | 0,1030 | 184 |
| M22 | 22 | 16,4 | 4,7 | 435,0 | 278,0 | 0,56 | 0,9680 | 0,6730 | 1,9230 | 1,3670 | 0,1080 | 0,0105 | n.d | n.d | 0,0034 | 1,1810 | 0,1460 | 171 |
| M23 | 23 | 15,9 | 4,6 | 434,0 | 278,0 | 0,55 | 0,9470 | 0,6480 | 1,8450 | 1,4540 | 0,1390 | 0,0095 | n.d | n.d | 0,0017 | 1,1930 | 0,1947 | 173 |
| M24 | 24 | 15,3 | 4,6 | 436,0 | 290,0 | 0,42 | 0,8160 | 0,6890 | 1,8290 | 1,4290 | 0,1250 | 0,0104 | n.d | n.d | 0,0012 | 1,4670 | 0,2018 | 182 |
| M25 | 25 | 14,8 | 4,7 | 442,0 | 283,0 | 0,37 | 0,8160 | 0,6890 | 1,8300 | 1,5490 | 0,1260 | 0,0102 | n.d | n.d | 0,0032 | 1,0530 | 0,1456 | 187 |
| M26 | 26 | 15,2 | 4,6 | 435,0 | 279,0 | 0,22 | 1,0420 | 0,6620 | 1,6460 | 1,4520 | 0,1370 | 0,0102 | n.d | n.d | 0,0012 | 1,2700 | 0,1764 | 179 |
| M27 | 27 | 14,6 | 4,3 | 441,0 | 282,0 | 0,16 | 0,9770 | 0,6940 | 1,7300 | 1,5710 | 0,1330 | 0,0097 | n.d | n.d | 0,0013 | 1,9120 | 0,1404 | 172 |

Tabla.5.40. Parámetros físico-químicos analizados en la presa del embalse El Sancho durante el muestreo en profundidad realizado en Octubre del primer año hidrológico (n.d.: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L).

5.2.1.3. Muestreo de sedimentos llevado a cabo, de manera puntal, durante el periodo seco en el embalse Marismillas (Masa 3)

Los datos derivados del muestreo de sedimentos llevado a cabo de manera puntal durante el periodo seco del primer año hidrológico en el embalse de Marismillas (Noviembre del 2011), no son expuestos en el presente apartado debido a su gran extensión, ya que se corresponden con más de 4700 registros.

5.2.1.4. Muestreo de agua llevado a cabo de manera puntal en mina Poderosa (Masa 4)

Las siguientes tablas (5.41, 5.42) muestran los valores de los parámetros físico-químicos medidos en las muestras de aguas tomadas en mina Poderosa en un muestreo puntal realizado durante el primer año hidrológico (Mayo del 2012), para los 16 puntos de muestreo descritos en el Capítulo 4.

| Muestras | pH | Cond ($\mu\text{S/cm}$) | TSD (mg/L) | T ^a (°C) | OD (mg/L) |
|----------|-----|------------------------------|---------------|------------------------|--------------|
| P1 | 2,5 | 4100,0 | 2630,0 | 24,8 | 2,50 |
| P2 | 2,6 | 1060,0 | 670,0 | 24,4 | 2,45 |
| P3 | 2,6 | 3990,0 | 2500,0 | 25,7 | 2,50 |
| P4 | 2,5 | 3880,0 | 2450,0 | 28,2 | 3,71 |
| P5 | 2,6 | 3700,0 | 2400,0 | 29,2 | 3,41 |
| P6 | 2,6 | 3700,0 | 2300,0 | 31,2 | 3,42 |
| P7 | 2,6 | 3600,0 | 2290,0 | 30,9 | 2,93 |
| P8 | 2,6 | 2570,0 | 1350,0 | 22,3 | 3,90 |
| P9 | 2,7 | 2900,0 | 1840,0 | 29 | 3,25 |
| P10 | 2,7 | 2800,0 | 1820,0 | 29 | 3,24 |
| P11 | 2,7 | 2800,0 | 1790,0 | 29,3 | 2,86 |
| P12 | 2,7 | 2760,0 | 1770,0 | 28,9 | 2,76 |
| P13 | 2,8 | 2600,0 | 1700,0 | 28,8 | 2,75 |
| P14 | 2,5 | 2740,0 | 1560,0 | 24,3 | 2,88 |
| P15 | 4,1 | 1790,0 | 930,0 | 25,5 | 3,97 |
| P16 | 3,0 | 1050,0 | 670,0 | 29,6 | 4,30 |

Tabla 5.41. Parámetros físico-químicos medidos en las muestras de aguas tomadas en mina Poderosa.

| Muestras | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Cd (mg/L) | Ni (mg/L) | Co (mg/L) | Pb (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | Al (mg/L) | Fe(II) (mg/L) | Fe(III) (mg/L) | SO42- (mg/L) |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|-------------------|-----------------|
| P1 | 2153,7600 | 49,0800 | 5,6330 | 6,0600 | 0,5890 | 0,4140 | 2,5580 | 0,6500 | 9,8170 | 0,0566 | n.d | 3,6000 | 1,8000 | 2400 |
| P2 | 2302,8000 | 51,1200 | 5,6210 | 6,0340 | 0,5440 | 0,3090 | 2,2500 | 0,6190 | 7,1180 | 0,0397 | n.d | 2,4000 | 1,8000 | 2534 |
| P3 | 1815,6000 | 50,4600 | 5,6050 | 6,0730 | 0,5490 | 0,3750 | 2,1470 | 0,6100 | 7,3830 | 0,0443 | n.d | 2,4000 | 1,7000 | 2604 |
| P4 | 2143,6800 | 51,8400 | 5,1670 | 6,0620 | 0,5020 | 0,3470 | 2,1360 | 0,6540 | 6,6640 | 0,0445 | n.d | 2,0000 | 1,4000 | 2100 |
| P5 | 1969,6800 | 51,9600 | 5,3490 | 6,0340 | 0,5190 | 0,3180 | 2,4040 | 0,6010 | 6,4710 | 0,0493 | n.d | 3,6000 | 1,4000 | 2632 |
| P6 | 2398,8000 | 54,1200 | 5,4460 | 6,0980 | 0,4820 | 0,3120 | 1,8660 | 0,6660 | 7,8280 | 0,0460 | n.d | 3,6000 | 2,0000 | 2268 |
| P7 | 2376,2400 | 51,2200 | 5,6000 | 6,0370 | 0,4690 | 0,2950 | 1,9680 | 0,6970 | 8,3560 | 0,0519 | n.d | 3,2000 | 2,0000 | 2492 |
| P8 | 192,6900 | 13,7760 | 9,8100 | 14,4420 | 0,0730 | 0,4240 | 0,6910 | 0,5960 | 0,1000 | 0,0046 | 0,1600 | 0,2000 | 0,7000 | 1600 |
| P9 | 1536,4800 | 39,1600 | 5,5420 | 8,7290 | 0,3640 | 0,3230 | 1,6060 | 0,6050 | 6,1470 | 0,0259 | n.d | 2,0000 | 1,4000 | 2148 |
| P10 | 1652,4000 | 35,9600 | 5,5440 | 8,7970 | 0,3710 | 0,3260 | 1,6850 | 0,6450 | 6,0260 | 0,0267 | n.d | 2,4000 | 1,6000 | 2366 |
| P11 | 1188,9600 | 34,3600 | 5,5490 | 8,8030 | 0,3870 | 0,3340 | 1,8530 | 0,6020 | 6,3020 | 0,0296 | n.d | 2,8000 | 1,6000 | 2124 |
| P12 | 1407,6000 | 32,3800 | 5,5480 | 8,8650 | 0,4040 | 0,3210 | 1,8500 | 0,6620 | 7,5630 | 0,0290 | n.d | 2,8000 | 1,5000 | 2004 |
| P13 | 1166,8800 | 30,1200 | 5,5390 | 9,0140 | 0,4070 | 0,3240 | 1,8510 | 0,5990 | 6,7890 | 0,0253 | n.d | 2,8000 | 1,4000 | 2100 |
| P14 | 1034,6400 | 70,3300 | 0,0160 | 13,9000 | 0,0220 | 0,3960 | 1,5000 | 0,6110 | 3,2300 | 0,0096 | n.d | 1,1000 | 0,2000 | 2492 |
| P15 | 0,1250 | 0,0762 | 0,5750 | 1,0990 | 0,0180 | 0,0011 | n.d. | 0,4280 | n.d. | n.d. | 1,0840 | 0,2000 | 0,8000 | 151 |
| P16 | 194,8800 | 12,6400 | 5,2100 | 4,1340 | 0,1550 | 0,1070 | 0,4130 | 0,3740 | 1,6570 | 0,0015 | 5,0280 | 0,5000 | 1,0000 | 1116 |

Tabla 5.42. Caracterización química de las muestras de aguas tomadas en mina

Poderosa (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L).

5.2.2. Segunda campaña de muestreo

5.2.2.1. Muestreo de agua semanal en el embalse El Sancho durante todo el año hidrológico (Masa 5)

Las tablas 5.43 a 5.45 muestran los valores que toman las variables analizadas derivadas del muestreo de agua llevado a cabo semanal durante el segundo año hidrológico (Octubre 2012 – Mayo 2013) en el punto cola del embalse El Sancho, en el punto presa del mismo, y en el cauce afectado por AMD aguas arriba de la presa (punto cauce).

| Fecha | T ^a (°C) | pH | Conductividad (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Pb (mg/L) | Cd (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Co (mg/L) | Ni (mg/L) | Mg (mg/L) | Ca (mg/L) | Al (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|------------|---------------------|-----|-----------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| 02/10/2012 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| 09/10/2012 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| 16/10/2012 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| 23/10/2012 | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m | n.m |
| 30/10/2012 | 15,9 | 3,7 | 378,0 | 186,4 | 10,3480 | 4,3690 | 0,2140 | 0,0397 | 2,8740 | 2,4790 | 0,3260 | 0,2670 | 29,2500 | 14,1600 | 0,4470 | n.d | n.d | 178 |
| 08/11/2012 | 15,9 | 3,8 | 348,0 | 192,0 | 12,2450 | 6,9730 | 0,2490 | 0,0234 | 2,1130 | 2,9460 | 0,2970 | 0,2910 | 33,4600 | 15,9800 | 0,4970 | n.d | n.d | 193 |
| 14/11/2012 | 16,2 | 3,8 | 386,0 | 189,2 | 14,7590 | 5,5980 | 0,2540 | 0,0365 | 3,2140 | 3,3460 | 0,3110 | 0,2640 | 37,6700 | 17,4700 | 0,5010 | n.d | n.d | 240 |
| 21/11/2012 | 16,6 | 3,8 | 279,0 | 179,5 | 12,0100 | 3,0180 | 0,1910 | 0,0230 | 2,7750 | 3,3890 | 0,3430 | 0,2070 | 48,5000 | 31,0000 | 0,7110 | n.d | 0,0048 | 304 |
| 28/11/2012 | 11,2 | 2,9 | 1130,0 | 730,0 | 30,2800 | 6,8330 | 0,2140 | 0,0460 | 5,3360 | 5,6180 | 0,9500 | 0,3400 | 32,2900 | 15,8700 | 0,5400 | 0,0032 | 0,0029 | 704 |
| 05/12/2012 | 11,3 | 2,6 | 791,0 | 507,0 | 35,3300 | 8,3780 | 0,2000 | 0,0560 | 5,4830 | 5,6280 | 1,0410 | 0,3750 | 57,7500 | 13,9400 | 0,6970 | 0,0028 | 0,0040 | 748 |
| 12/12/2012 | 9,3 | 3,1 | 496,0 | 318,0 | 16,1160 | 2,7160 | 0,2100 | 0,0360 | 2,7540 | 5,3220 | 0,3580 | 0,1810 | 75,3300 | 11,3300 | 0,7400 | 0,0006 | 0,0022 | 362 |
| 19/12/2012 | 13,5 | 2,7 | 640,0 | 410,0 | 21,4400 | 5,3210 | 0,2300 | 0,0360 | 2,5410 | 5,2520 | 0,6200 | 0,2220 | 30,2700 | 19,8800 | 0,7060 | 0,0015 | 0,0050 | 564 |
| 26/12/2012 | 12,7 | 2,8 | 655,0 | 421,0 | 26,8900 | 6,9350 | 0,2370 | 0,0380 | 4,0980 | 5,6330 | 0,9200 | 0,3060 | 32,8500 | 12,6300 | 0,7190 | 0,0029 | 0,0017 | 624 |
| 03/01/2013 | 10,1 | 2,8 | 804,0 | 514,0 | 36,7400 | 10,0200 | 0,1000 | 0,0650 | 5,0250 | 5,1820 | 1,4220 | 0,4460 | 90,8700 | 12,6800 | 1,0170 | 0,0078 | 0,0059 | 728 |
| 10/01/2013 | 11,5 | 2,6 | 821,0 | 526,0 | 35,3900 | 9,6420 | 0,2280 | 0,0480 | 3,3300 | 5,3750 | 1,0570 | 0,3700 | 62,6800 | 10,2900 | 0,5470 | 0,0052 | 0,0039 | 728 |
| 16/01/2013 | 10,8 | 2,6 | 859,0 | 550,0 | 51,7200 | 15,1100 | 0,0720 | 0,1060 | 5,9400 | 10,8200 | 0,7790 | 0,3130 | 73,7600 | 11,0800 | 0,5070 | 0,0171 | 0,0013 | 1152 |
| 23/01/2013 | 10,0 | 2,7 | 531,0 | 340,0 | 22,6400 | 7,5150 | 0,1070 | 0,0810 | 4,7960 | 5,5500 | 0,3720 | 0,1920 | 70,1700 | 11,3100 | 0,3590 | 0,0064 | 0,0027 | 520 |
| 30/01/2013 | 11,7 | 3,3 | 433,0 | 277,0 | 19,1610 | 5,4880 | 0,0920 | 0,0780 | 4,4100 | 4,6970 | 0,2420 | 0,1650 | 99,7800 | 13,2900 | 0,4430 | 0,0034 | 0,0064 | 444 |
| 06/02/2013 | 10,3 | 2,8 | 645,0 | 413,0 | 22,4200 | 9,4010 | 0,0410 | 0,0920 | 6,0470 | 5,4010 | 0,3980 | 0,2520 | 79,1800 | 26,9200 | 0,4130 | 0,0076 | 0,0236 | 664 |
| 13/02/2013 | 13,6 | 2,8 | 778,0 | 498,0 | 35,0600 | 7,0370 | 0,4110 | 0,0240 | 11,4000 | 7,9550 | 0,5240 | 0,2020 | 80,8800 | 21,5600 | 0,6600 | 0,0076 | 0,0296 | 592 |
| 20/02/2013 | 12,0 | 2,7 | 582,0 | 989,0 | 51,5700 | 10,3200 | 0,4260 | 0,0490 | 12,8300 | 11,3200 | 0,9530 | 0,3470 | 48,6200 | 36,9600 | 0,4810 | 0,0178 | 0,0455 | 1146 |
| 27/02/2013 | 10,7 | 2,6 | 354,0 | 553,0 | 14,3700 | 5,3270 | 0,1420 | 0,1390 | 6,2460 | 5,8500 | 0,5110 | 0,1800 | 74,7900 | 8,4040 | 0,5315 | 0,0097 | 0,0702 | 476 |
| 06/03/2013 | 15,9 | 3,4 | 152,4 | 979,0 | 11,4500 | 1,0710 | 0,0910 | 0,1300 | 2,2480 | 1,0870 | 0,1310 | 0,0700 | 77,4400 | 5,5230 | 0,4338 | 0,0016 | 0,0178 | 149 |
| 11/03/2013 | 15,7 | 4,8 | 265,0 | 169,7 | 20,3900 | 2,4790 | 0,0340 | 0,1350 | 4,1070 | 2,2770 | 0,1070 | 0,0900 | 35,9500 | 9,4800 | 0,5067 | 0,0045 | 0,0112 | 320 |
| 18/03/2013 | 15,3 | 4,8 | 324,0 | 198,0 | 24,9300 | 4,4260 | 0,0560 | 0,1470 | 5,8740 | 3,6420 | 0,2890 | 0,1270 | 52,4000 | 6,9180 | 0,6073 | 0,0033 | 0,0349 | 368 |
| 25/03/2013 | 15,6 | 4,9 | 456,0 | 292,0 | 13,2250 | 2,2070 | 0,0400 | 0,1070 | 6,7270 | 1,1700 | 0,1970 | 0,1140 | 34,1200 | 7,2750 | 0,7073 | 0,0140 | 0,0054 | 158 |
| 01/04/2013 | 16,0 | 7,1 | 272,0 | 174,1 | 12,5970 | 0,9090 | 0,0470 | 0,1050 | 0,0420 | 0,3270 | 0,0876 | 0,0678 | 27,7600 | 14,0000 | 0,4160 | 0,0027 | 0,0017 | 81 |
| 08/04/2013 | 15,3 | 3,7 | 1082,0 | 693,0 | 20,5700 | 1,5950 | 0,0279 | 0,1230 | 5,6570 | 4,2320 | 0,0645 | 0,0774 | 12,7800 | 23,3100 | 0,5758 | 0,0190 | 0,0036 | 356 |
| 15/04/2013 | 19,4 | 2,9 | 1692,0 | 1083,0 | 32,2000 | 1,9280 | 0,0134 | 0,1470 | 6,4020 | 7,5630 | 0,0763 | 0,0893 | 15,3500 | 19,4700 | 0,5581 | 0,0081 | 0,0072 | 612 |
| 22/04/2013 | 20,1 | 2,9 | 1785,0 | 1141,0 | 40,3200 | 7,6580 | 0,0796 | 0,0230 | 7,1600 | 7,9160 | 0,4490 | 0,1510 | 13,4100 | 17,6400 | 0,5817 | 0,2886 | 0,0069 | 636 |
| 02/05/2013 | 21,1 | 2,8 | 1658,0 | 1236,0 | 29,4800 | 9,6240 | 0,0847 | 0,0297 | 6,9870 | 8,3480 | 0,6670 | 0,1970 | 12,5400 | 19,3400 | 0,4780 | 0,1960 | 0,0048 | 768 |
| 06/05/2013 | 21,8 | 2,8 | 2340,0 | 1496,0 | 32,9000 | 11,6600 | 0,0873 | 0,0387 | 7,5480 | 12,4200 | 0,8730 | 0,2910 | 8,4100 | 15,3200 | 0,3827 | 0,1535 | 0,0026 | 835 |

Tabla 5.43. Caracterización química de las muestras de agua tomadas en el punto cauce del embalse El Sancho (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L; n.m: No medido).

| Fecha | T ^a (°C) | pH | Conductividad (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Pb (mg/L) | Cd (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Co (mg/L) | Ni (mg/L) | Mg (mg/L) | Ca (mg/L) | Al (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|------------|---------------------|-----|-----------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| 02/10/2012 | 21,7 | 3,3 | 560,0 | 386,0 | 2,5540 | 0,0173 | 0,2250 | 0,0160 | 0,5770 | 5,0080 | 0,0833 | 0,0630 | 45,4500 | 47,6300 | 0,5570 | n.d | 0,0009 | 296 |
| 09/10/2012 | 21,5 | 3,3 | 558,0 | 420,0 | 4,2030 | 0,2460 | 0,2190 | 0,0150 | 0,4000 | 5,3040 | 0,0553 | 0,0630 | 35,9600 | 36,8600 | 0,6990 | n.d | 0,0007 | 262 |
| 16/10/2012 | 21,9 | 3,0 | 406,0 | 260,0 | 1,6120 | 0,1510 | 0,2180 | 0,0180 | 0,3640 | 5,2370 | 0,0586 | 0,0520 | 44,8600 | 35,7600 | 0,4840 | n.d | 0,0015 | 244 |
| 23/10/2012 | 19,4 | 3,1 | 506,0 | 340,0 | 4,6390 | 0,4130 | 0,1900 | 0,0180 | 0,7640 | 4,6230 | 0,0411 | 0,0540 | 66,4700 | 54,7200 | 0,8470 | n.d | 0,0008 | 278 |
| 30/10/2012 | 17,4 | 3,3 | 717,0 | 459,0 | 7,7680 | 1,5700 | 0,2100 | 0,0400 | 4,8370 | 11,1800 | 0,6580 | 0,3220 | 26,9900 | 57,6700 | 0,7500 | n.d | 0,0030 | 764 |
| 08/11/2012 | 18,6 | 3,1 | 734,0 | 468,0 | 2,4790 | 0,3740 | 0,2180 | 0,0160 | 1,3050 | 1,2210 | 0,0210 | 0,0530 | 67,0200 | 57,4100 | 0,0904 | n.d | 0,0021 | 135 |
| 14/11/2012 | 15,2 | 3,9 | 797,0 | 508,0 | 3,7630 | 1,3540 | 0,2020 | 0,0250 | 3,6680 | 3,2230 | 0,0167 | 0,1150 | 21,1800 | 42,8100 | 0,7260 | n.d | 0,0041 | 296 |
| 21/11/2012 | 15,0 | 3,6 | 907,0 | 578,0 | 4,3530 | 1,5610 | 0,2080 | 0,0170 | 3,1140 | 6,4020 | 0,2570 | 0,1740 | 47,7800 | 18,5900 | 0,5760 | n.d | 0,0042 | 280 |
| 28/11/2012 | 12,8 | 3,2 | 751,0 | 477,0 | 4,7760 | 3,3690 | 0,2210 | 0,0210 | 3,0370 | 5,6560 | 0,3030 | 0,1760 | 83,5000 | 19,4000 | 0,7320 | n.d | 0,0086 | 398 |
| 05/12/2012 | 12,9 | 3,0 | 329,0 | 211,0 | 3,3110 | 2,0110 | 0,2120 | 0,0280 | 3,5130 | 3,4000 | 0,3090 | 0,1620 | 48,8900 | 20,3600 | 0,7550 | n.d | 0,0038 | 312 |
| 12/12/2012 | 11,9 | 3,4 | 430,0 | 310,0 | 1,8350 | 1,6060 | 0,2310 | 0,0310 | 2,7260 | 6,3550 | 0,2380 | 0,1350 | 89,7400 | 20,9100 | 0,6510 | n.d | 0,0045 | 260 |
| 19/12/2012 | 15,1 | 3,3 | 325,0 | 207,0 | 0,6070 | 2,0120 | 0,2320 | 0,0320 | 1,3310 | 7,7070 | 0,3210 | 0,1450 | 43,9800 | 20,9900 | 0,6920 | n.d | 0,0071 | 302 |
| 26/12/2012 | 14,5 | 3,2 | 308,0 | 198,0 | 1,5470 | 1,9780 | 0,2114 | 0,0289 | 1,8790 | 6,3450 | 0,2210 | 0,1340 | 49,6800 | 20,8200 | 0,6630 | n.d | 0,0080 | 270 |
| 03/01/2013 | 13,2 | 3,1 | 300,0 | 196,2 | 2,4470 | 1,7440 | 0,2060 | 0,0210 | 2,7470 | 4,5180 | 0,4050 | 0,1610 | 60,1800 | 20,7700 | 0,7510 | n.d | 0,0087 | 258 |
| 10/01/2013 | 11,1 | 3,1 | 281,0 | 180,5 | 1,2560 | 1,4150 | 0,2240 | 0,0200 | 5,1740 | 5,6630 | 0,3180 | 0,1470 | 38,8100 | 17,8200 | 0,1570 | n.d | 0,0039 | 278 |
| 16/01/2013 | 11,8 | 2,9 | 321,0 | 206,0 | 4,0320 | 2,8530 | 0,1110 | 0,0820 | 3,4660 | 3,8530 | 0,1780 | 0,1160 | 79,1200 | 15,1100 | 0,4850 | 0,0028 | 0,0155 | 300 |
| 23/01/2013 | 10,9 | 2,7 | 577,0 | 369,0 | 11,8800 | 10,0400 | 0,0950 | 0,0910 | 5,5210 | 6,6720 | 0,4720 | 0,2200 | 74,3800 | 18,8100 | 0,4770 | 0,0095 | 0,0406 | 704 |
| 30/01/2013 | 11,7 | 2,9 | 411,0 | 264,0 | 5,5400 | 5,2430 | 0,0690 | 0,0780 | 3,6230 | 4,5930 | 0,2290 | 0,1710 | 103,4000 | 18,4700 | 0,4120 | 0,0024 | 0,0182 | 544 |
| 06/02/2013 | 12,6 | 3,3 | 476,0 | 305,0 | 5,8880 | 5,1760 | 0,0480 | 0,0850 | 4,3350 | 4,5180 | 0,2380 | 0,1760 | 97,2300 | 61,7700 | 0,3980 | 0,0047 | 0,0038 | 300 |
| 13/02/2013 | 16,2 | 3,3 | 511,0 | 320,0 | 4,4060 | 3,1240 | 0,4210 | 0,0120 | 8,7730 | 0,4220 | 0,2470 | 0,0790 | 105,0000 | 34,4200 | 0,4820 | 0,0028 | 0,0172 | 338 |
| 20/02/2013 | 14,9 | 3,3 | 439,0 | 281,0 | 3,9090 | 3,1990 | 0,4100 | 0,0070 | 9,0660 | 0,4925 | 0,2050 | 0,0720 | 74,1300 | 29,5300 | 0,4370 | 0,0056 | 0,0122 | 394 |
| 27/02/2013 | 16,4 | 3,0 | 462,0 | 296,0 | 10,2800 | 4,0850 | 0,1030 | 0,1420 | 5,7840 | 5,2420 | 0,3220 | 0,2010 | 83,8700 | 19,9100 | 0,7025 | 0,0045 | 0,0200 | 244 |
| 06/03/2013 | 17,9 | 3,7 | 125,0 | 80,0 | 6,2400 | 0,6480 | 0,0870 | 0,1290 | 1,4570 | 0,7050 | 0,1000 | 0,0880 | 61,7300 | 7,4390 | 0,2594 | 0,0009 | 0,1445 | 121 |
| 11/03/2013 | 16,8 | 5,1 | 146,0 | 93,5 | 3,7910 | 0,8340 | 0,0720 | 0,1290 | 2,1000 | 2,2770 | 0,1740 | 0,0430 | 93,1100 | 8,1920 | 0,3451 | 0,0032 | 0,0139 | 130 |
| 18/03/2013 | 17,6 | 5,6 | 188,0 | 124,0 | 0,4410 | 0,8150 | 0,0160 | 0,1340 | 2,2840 | 2,2350 | 0,1070 | 0,0400 | 89,0700 | 20,4800 | 0,2724 | 0,0021 | 0,0085 | 132 |
| 25/03/2013 | 18,3 | 6,9 | 268,0 | 171,8 | 0,5720 | 1,3820 | 0,0500 | 0,1040 | 1,1670 | 0,4250 | 0,0997 | 0,0321 | 87,3000 | 8,9740 | 0,8904 | 0,0018 | 0,0041 | 93 |
| 01/04/2013 | 12,9 | 5,2 | 366,0 | 234,0 | 0,9670 | 0,8980 | 0,0263 | 0,1090 | 2,1820 | 1,0500 | 0,0864 | 0,0215 | 10,1000 | 18,7700 | 0,4201 | 0,0016 | 0,0031 | 137 |
| 08/04/2013 | 19,5 | 4,9 | 407,0 | 261,0 | 1,6310 | 0,7130 | 0,0143 | 0,1140 | 2,7070 | 1,2940 | 0,0843 | 0,0112 | 30,0500 | 24,2900 | 0,5211 | 0,0054 | 0,0023 | 151 |
| 15/04/2013 | 25,0 | 4,1 | 445,0 | 284,0 | 0,4270 | 0,1974 | 0,0098 | 0,1470 | 2,6630 | 1,4720 | 0,0731 | 0,0347 | 24,9080 | 20,2800 | 0,4764 | 0,0023 | 0,0029 | 155 |
| 22/04/2013 | 19,4 | 3,7 | 575,0 | 368,0 | 1,3360 | 1,4690 | 0,0112 | 0,0836 | 3,2870 | 1,9320 | 0,1140 | 0,0997 | 12,9570 | 19,2000 | 0,7543 | 0,0240 | 0,0029 | 176 |
| 02/05/2013 | 19,6 | 3,8 | 352,0 | 568,0 | 3,2900 | 1,4560 | 0,0088 | 0,0936 | 3,3610 | 2,0960 | 0,0974 | 0,0746 | 10,7310 | 17,4200 | 0,5677 | 0,5479 | 0,0036 | 185 |
| 06/05/2013 | 22,5 | 4,2 | 458,0 | 294,0 | 6,2210 | 1,3830 | 0,0197 | 0,0776 | 3,2380 | 2,0640 | 0,2346 | 0,0846 | 31,1300 | 39,3400 | 0,3803 | 0,0077 | 0,0024 | 175 |

Tabla 5.44. Caracterización química de las muestras de agua tomadas en el punto cola del embalse El Sancho (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L).

| Fecha | Tª (°C) | pH | Conductividad (µS/cm) | TSD (mg/L) | Fe (mg/L) | Cu (mg/L) | Pb (mg/L) | Cd (mg/L) | Zn (mg/L) | Mn (mg/L) | Co (mg/L) | Ni (mg/L) | Mg (mg/L) | Ca (mg/L) | Al (mg/L) | As (mg/L) | Sb (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) |
|------------|---------|-----|-----------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| 02/10/2012 | 21,8 | 2,9 | 364,0 | 221,0 | 0,3879 | 0,7496 | 0,2243 | 0,0213 | 2,4790 | 2,1140 | 0,2347 | 0,0844 | 37,2500 | 21,6900 | 0,6974 | nd | 0,0025 | 258 |
| 09/10/2012 | 21,6 | 2,9 | 346,0 | 218,0 | 0,5420 | 0,8570 | 0,2010 | 0,0240 | 2,7130 | 2,3080 | 0,1672 | 0,0730 | 36,2000 | 20,1400 | 0,6680 | n.d | 0,0018 | 240 |
| 16/10/2012 | 22,8 | 2,8 | 320,0 | 205,0 | 0,1700 | 0,5690 | 0,2310 | 0,0220 | 1,9630 | 1,5300 | 0,1152 | 0,0570 | 43,5100 | 19,0300 | 0,6270 | n.d | 0,0081 | 252 |
| 23/10/2012 | 20,8 | 2,8 | 298,0 | 186,0 | 0,4940 | 0,7250 | 0,1930 | 0,0270 | 2,7460 | 2,4500 | 0,1670 | 0,0670 | 39,9200 | 24,6000 | 0,6470 | n.d | 0,0042 | 238 |
| 30/10/2012 | 19,3 | 2,9 | 274,0 | 176,0 | 0,5640 | 0,6680 | 0,2010 | 0,0280 | 2,7170 | 2,4800 | 0,1703 | 0,0670 | 37,4100 | 27,0700 | 0,6350 | n.d | 0,0019 | 258 |
| 08/11/2012 | 19,2 | 2,9 | 320,0 | 198,0 | 0,5974 | 0,7124 | 0,2147 | 0,0298 | 2,9470 | 2,6470 | 0,1934 | 0,0711 | 34,3100 | 25,1760 | 0,6412 | n.d | 0,0248 | 236 |
| 14/11/2012 | 19,3 | 2,9 | 348,0 | 223,0 | 0,6630 | 0,6680 | 0,2130 | 0,0290 | 2,7230 | 2,5100 | 0,2830 | 0,0660 | 33,6800 | 22,8100 | 0,6380 | n.d | 0,0034 | 246 |
| 21/11/2012 | 16,4 | 2,9 | 368,0 | 256,0 | 0,9478 | 0,9634 | 0,2855 | 0,0234 | 2,4360 | 3,6470 | 0,2850 | 0,0964 | 29,3400 | 24,4700 | 0,5470 | n.d | 0,0020 | 260 |
| 28/11/2012 | 14,8 | 2,8 | 352,0 | 225,0 | 1,2760 | 0,9410 | 0,2130 | 0,0150 | 2,8110 | 4,6140 | 0,7268 | 0,1700 | 28,6700 | 26,4200 | 0,3250 | n.d | 0,0024 | 218 |
| 05/12/2012 | 14,2 | 3,1 | 345,0 | 220,0 | 1,4430 | 1,0430 | 0,1810 | 0,0170 | 3,1430 | 6,5240 | 0,2310 | 0,1640 | 41,6000 | 25,2300 | 0,7090 | n.d | 0,0050 | 242 |
| 12/12/2012 | 13,4 | 3,0 | 319,0 | 206,0 | 1,6050 | 1,0720 | 0,2310 | 0,0290 | 4,1300 | 6,1230 | 0,2370 | 0,1400 | 88,2900 | 25,2300 | 0,7170 | n.d | 0,0022 | 254 |
| 19/12/2012 | 14,3 | 2,8 | 176,1 | 274,0 | 1,4480 | 1,0310 | 0,2300 | 0,0290 | 3,7130 | 5,7220 | 0,7268 | 0,1270 | 35,2300 | 22,5700 | 0,7200 | n.d | 0,0042 | 234 |
| 26/12/2012 | 14,1 | 3,0 | 278,0 | 177,9 | 1,3170 | 1,1000 | 0,2200 | 0,0310 | 2,7980 | 5,6190 | 0,2850 | 0,1270 | 31,5200 | 23,2200 | 0,6160 | n.d | 0,0040 | 270 |
| 03/01/2013 | 13,3 | 3,2 | 272,0 | 174,5 | 1,3380 | 1,0720 | 0,2320 | 0,0130 | 2,3410 | 6,9270 | 0,2830 | 0,1440 | 67,1800 | 21,1100 | 0,4410 | n.d | 0,0012 | 226 |
| 10/01/2013 | 13,1 | 3,2 | 257,0 | 164,7 | 1,2850 | 1,0280 | 0,2240 | 0,0150 | 3,4710 | 5,7640 | 0,2600 | 0,1120 | 16,7600 | 20,8200 | 0,5470 | n.d | 0,0073 | 238 |
| 16/01/2013 | 13,6 | 2,9 | 264,0 | 169,2 | 1,5760 | 0,9250 | 0,1050 | 0,0740 | 2,4930 | 2,9540 | 0,1460 | 0,1110 | 89,0000 | 26,9500 | 0,3590 | 0,0026 | 0,0133 | 280 |
| 23/01/2013 | 12,0 | 3,0 | 268,0 | 171,4 | 1,3800 | 0,1520 | 0,0490 | 0,0690 | 3,0280 | 3,0570 | 0,1220 | 0,1100 | 62,8400 | 63,9600 | 0,3470 | 0,0006 | 0,0027 | 280 |
| 30/01/2013 | 14,0 | 3,2 | 263,0 | 168,6 | 1,7000 | 1,8100 | 0,0370 | 0,0710 | 2,6020 | 3,0810 | 0,1050 | 0,1240 | 68,9100 | 33,6300 | 0,3550 | 0,0013 | 0,0066 | 252 |
| 06/02/2013 | 12,4 | 3,3 | 334,0 | 214,0 | 1,4910 | 1,7520 | 0,0470 | 0,0740 | 3,0550 | 2,0380 | 0,1350 | 0,1210 | 57,0500 | 28,0600 | 0,4120 | 0,0014 | 0,0022 | 278 |
| 13/02/2013 | 13,2 | 3,4 | 361,0 | 230,0 | 1,6950 | 1,2930 | 0,3690 | 0,0020 | 5,3540 | 0,0890 | 0,1160 | 0,0320 | 85,4800 | 31,3500 | 0,3950 | 0,0006 | 0,0055 | 268 |
| 20/02/2013 | 12,3 | 3,7 | 103,4 | 290,0 | 1,5040 | 1,3300 | 0,3650 | 0,0010 | 5,6650 | 3,2590 | 0,1410 | 0,0120 | 56,6600 | 32,0000 | 0,3740 | 0,0007 | 0,0049 | 284 |
| 27/02/2013 | 11,1 | 3,1 | 165,8 | 259,0 | 2,0180 | 1,2120 | 0,1180 | 0,1330 | 3,3190 | 2,8220 | 0,1960 | 0,0610 | 59,7000 | 20,1900 | 0,7848 | 0,0043 | 0,0062 | 191 |
| 06/03/2013 | 14,0 | 2,8 | 168,4 | 263,0 | 1,3580 | 1,2560 | 0,1000 | 0,1320 | 3,3210 | 2,8770 | 0,1320 | 0,0880 | 36,5300 | 12,7500 | 0,5011 | 0,0041 | 0,0257 | 274 |
| 11/03/2013 | 14,7 | 3,2 | 211,0 | 135,3 | 0,5950 | 0,9560 | 0,0720 | 0,1330 | 2,6380 | 2,2480 | 0,1280 | 0,0510 | 62,5800 | 16,7600 | 0,3373 | 0,0008 | 0,0240 | 198 |
| 18/03/2013 | 15,8 | 3,8 | 324,0 | 226,0 | 0,9640 | 0,9810 | 0,0220 | 0,1370 | 2,6820 | 2,2450 | 0,1290 | 0,0410 | 57,6100 | 17,6400 | 0,3360 | 0,0003 | 0,0111 | 174 |
| 25/03/2013 | 16,5 | 4,4 | 508,0 | 325,0 | 0,9740 | 1,4320 | 0,0490 | 0,1100 | 2,5660 | 2,3710 | 0,0976 | 0,0249 | 34,8600 | 24,1300 | 0,6262 | 0,0037 | 0,0032 | 169 |
| 01/04/2013 | 16,9 | 4,6 | 464,0 | 297,0 | 0,4430 | 0,7990 | 0,0796 | 0,1090 | 2,3940 | 2,1010 | 0,0876 | 0,0113 | 9,1890 | 19,2500 | 0,4056 | 0,0002 | 0,0039 | 166 |
| 08/04/2013 | 17,5 | 4,8 | 435,0 | 278,0 | 0,6470 | 0,5130 | 0,0847 | 0,1120 | 1,6800 | 1,8670 | 0,0846 | 0,0147 | 10,8700 | 20,4200 | 0,5266 | 0,0129 | 0,0023 | 156 |
| 15/04/2013 | 17,9 | 3,7 | 575,0 | 368,0 | 0,9790 | 1,4430 | 0,0996 | 0,1200 | 2,3490 | 1,6390 | 0,0943 | 0,0235 | 12,4600 | 18,9900 | 0,4591 | 0,0028 | 0,0016 | 152 |
| 22/04/2013 | 21,3 | 4,2 | 420,0 | 269,0 | 2,3360 | 1,6820 | 0,1110 | 0,0970 | 2,1620 | 1,5090 | 0,0843 | 0,0170 | 44,6400 | 18,4000 | 0,5104 | 0,0252 | 0,0018 | 144 |
| 02/05/2013 | 27,8 | 4,2 | 420,0 | 266,0 | 1,6600 | 1,6960 | 0,0974 | 0,1240 | 2,1460 | 1,3270 | 0,0774 | 0,0347 | 34,6300 | 23,7500 | 0,2379 | 0,0098 | 0,0025 | 138 |
| 06/05/2013 | 22,5 | 4,2 | 458,0 | 294,0 | 2,2710 | 1,1690 | 0,0774 | 0,1380 | 2,2380 | 1,5650 | 0,0733 | 0,0300 | 26,6200 | 35,0100 | 0,3961 | 0,0999 | 0,0019 | 142 |

Tabla 5.45. Caracterización química de las muestras de agua tomadas en el punto presa del embalse El Sancho (n.d: Por debajo del límite de detección de 0,001 µg/L).

5.2.2.2. Determinación de parámetros físico-químicos obtenidos de las sondas multiparamétricas instaladas en la cola y en la presa del embalse El Sancho durante todo el año hidrológico (Masa 6)

Los datos obtenidos mediante el empleo de las sondas multiparamétricas no son expuestos en el presente apartado debido a su gran extensión, ya que se corresponden con más de 18000 registros.

5.3. ANALISIS GRAFICO-ESTADISTICO

5.3.1. Primera campaña de muestreo

5.3.1.1. Muestreo de agua bimensual en todos los embalses objeto de estudio durante todo el año hidrológico (Masa 1)

Para el estudio de la masa de datos obtenida en el muestreo de agua en los puntos cola de los embalses objeto de estudio durante la primera campaña de muestreo, se han realizado los siguientes tratamientos: sumario estadístico, análisis cluster y análisis gráfico. No se ha podido realizar el estudio de los puntos cauce debido a que en muchos casos los datos se encontraban incompletos por la escasez de precipitaciones durante este primer año hidrológico.

Los resultados obtenidos han sido publicados en diferentes trabajos: Cerón *et al.*, (2013b); Grande *et al.*, (2013b) y Santisteban *et al.*, (2012-2013), en los que se abordan diferentes objetivos enfocados a la definición de procesos y resultados.

Sumario estadístico

En la Tabla 5.46 se muestra el sumario estadístico de los valores medios de los parámetros analizados para todos los embalses en el punto cola.

Se puede observar como el pH toma un valor medio de 4,7, siendo el valor mínimo de 2,2 y el máximo de 6,6, correspondientes a los embalses de Marismillas y Herrerías, respectivamente.

La conductividad eléctrica presenta un valor medio de 945,2 $\mu\text{S/cm}$, con un máximo de 6074,1 $\mu\text{S/cm}$ medido en el embalse Aguas Ácidas y un mínimo de 141,74 $\mu\text{S/cm}$ para el embalse La Joya.

El mayor valor de concentración del total de sólidos disueltos (TSD) ha sido de 5849,3 mg/L en el embalse Marismillas, mientras que el mínimo ha sido de 90,6 mg/L en el embalse La Joya. La concentración media de TSD ha sido de 772,8 mg/L.

En cuanto a los sulfatos analizados, la media es de 454 mg/L, alcanzando un máximo de 3086 mg/L en el embalse Aguas Ácidas y un mínimo de 2 mg/L en el embalse Corumbel.

Las concentraciones medias de los metales analizados varían según el siguiente orden: Fe > Zn > Cu > Mn > Al > Pb > Cd > As > Sb.

En estos metales, encontramos que los valores máximos y mínimos son respectivamente: Fe (2265,87 mg/L y 0,13 mg/L); Cu (207,50 mg/L y 0,04 mg/L); Zn (111,52 mg/L y 0,09 mg/L); Mn (35,22 mg/L y 0,17 mg/L); Cd (1,49 mg/L y 0,07 mg/L); As (1,85 mg/L y 0,001 mg/L); Sb (0,11 mg/L y 0,001 mg/L); Pb (0,59 mg/L y 0,25 mg/L) y Al (0,70 mg/L y 0,06 mg/L).

En general, se observa un elevado valor de la varianza, tanto en los parámetros físico-químicos, como en las concentraciones de los metales y sulfatos. Destacan los valores de la conductividad eléctrica > TSD > sulfatos > Fe > Cu > Zn > Mn, por sus altos valores. El resto de parámetros presentan valores de varianza mucho menores, no siendo tan significativas: pH > As > Cd > Al > Pb > Sb.

| | Recuento | Media | Varianza | Mínimo | Máximo |
|---------------------------|----------|----------|-------------|--------|-----------|
| pH | 23 | 4,7 | 2,0 | 2,2 | 6,7 |
| Cond ($\mu\text{S/cm}$) | 23 | 945,2 | 1900000,0 | 141,7 | 6074,2 |
| SO_4^{2-} (mg/L) | 23 | 455 | 620265 | 2 | 3086 |
| TSD (mg/L) | 23 | 772,8 | 1900000,0 | 90,7 | 5849,3 |
| Fe (mg/L) | 23 | 117,0690 | 223704,0000 | 0,1300 | 2265,8700 |
| Cu (mg/L) | 23 | 10,2509 | 1845,2700 | 0,0400 | 207,0500 |
| Mn (mg/L) | 23 | 5,4422 | 101,5300 | 0,1700 | 35,2200 |
| As (mg/L) | 23 | 0,1252 | 0,1516 | 0,0012 | 1,8500 |
| Cd (mg/L) | 23 | 0,2200 | 0,0965 | 0,0700 | 1,4900 |
| Sb (mg/L) | 23 | 0,0150 | 0,0008 | 0,0007 | 0,1090 |
| Pb (mg/L) | 23 | 0,3440 | 0,0092 | 0,2452 | 0,5898 |
| Al (mg/L) | 23 | 0,3695 | 0,0251 | 0,0582 | 0,6994 |

Tabla 5.46. Sumario estadístico de los valores medios de los parámetros obtenidos en el punto cola de los diferentes embalses muestreados (Grande *et al.*, 2013b).

Para un estudio más detallado del sumario estadístico se han agrupado los embalses de acuerdo con sus valores medios de pH, considerando que éste es el principal indicador de su grado de afección por AMD. De este modo se definieron tres grupos de embalses que se muestran en la Tabla 5.47.

| pH | Grupo | Embalses |
|-------------|-------|-------------------|
| <3 | 1 | Aguas ácidas |
| | | Gossan |
| | | Marismillas |
| | | Cueva de la Mora |
| 3-5 | 2 | Andévalo-Cobica |
| | | Andévalo-Chorrito |
| | | del Pino |
| | | Grande |
| | | El Sancho |
| | | Olivargas |
| >5 | 3 | Agrio |
| | | Campanario |
| | | Chanza |
| | | Corumbel |
| | | Dique I |
| | | Dique II |
| | | Garnacha |
| | | Herrerías |
| | | Lagunazo |
| | | La Joya |
| | | Silillos I |
| Silillos II | | |
| Puerto León | | |

Tabla 5.47. Agrupación de los embalses en función del valor de pH.

En la Tabla 5.48 se desglosan los estadísticos básicos (mínimo, máximo, media y varianza) de las variables determinadas en el muestreo realizado en cada uno de los embalses, agrupados en función de su pH.

La conductividad tiene un rango de variación muy amplio en los tres grupos, presentando el Grupo 1 los valores más altos, comprendidos entre 2088,1 y 6074,1 $\mu\text{S/cm}$. Este grupo, a su vez, presenta los valores de varianza más elevados (3171130,0). En el Grupo 2, la conductividad toma valores intermedios (entre 300,5 y 1099,6 $\mu\text{S/cm}$), obteniéndose en el Grupo 3, los valores más bajos (entre 141,7 y 559,4 $\mu\text{S/cm}$).

En cuanto a la concentración de los iones analizados, cabe destacar por su magnitud, la alta concentración de sulfatos obtenida, superando siempre a la concentración del resto de parámetros analizados. En el Grupo 1 los sulfatos alcanzan los 3086,35 mg/L. Para el resto de parámetros, los valores se encuentran siempre dentro de lo que cabe esperar en estos rangos de pH y en el contexto paragenético descrito en la FPI (Grande *et al.*, 2010b). En resumen, se aprecia como el Grupo 1 se diferencia de los otros dos por mostrar los mayores grados de afección por AMD, como respuesta a su menor valor de pH.

En relación con el rango para cada grupo, el contraste entre valores extremos puede deberse por un lado, a la llegada de aguas contaminadas al embalse, debido a la proximidad al foco emisor de AMD, y por otro lado, al efecto tampón que se origina por la mezcla de aguas contaminadas con aguas sin contaminar, con el resultado final de una mezcla de pH intermedio.

De esta forma, los valores más extremos de pH observados en el Grupo 1, podrían deberse al aporte a estos embalses de aguas afectadas por los efluentes de las minas situadas en sus proximidades. En el caso de los Grupos 2 y 3, los aportes de aguas podrían proceder de cauces donde tiene lugar la mezcla de aguas no contaminadas con aguas ácidas procedentes de las minas que están en su cuenca. Así, en este contexto, tiene lugar un efecto tampón que ejerce la cuenca receptora con el resultado final de una mezcla de pH intermedio más elevado (Cerón *et al.*, 2013b).

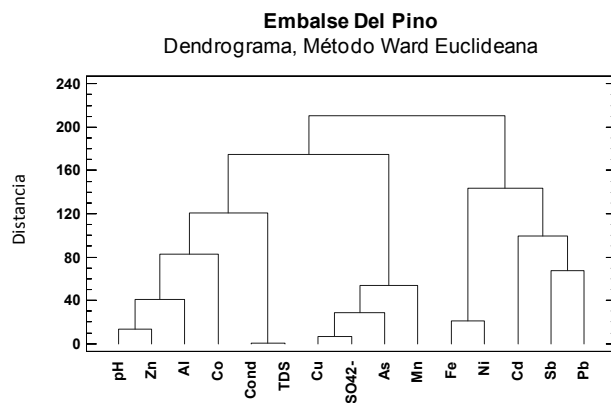
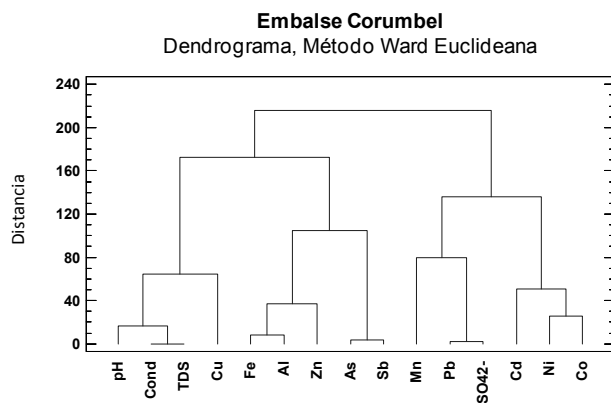
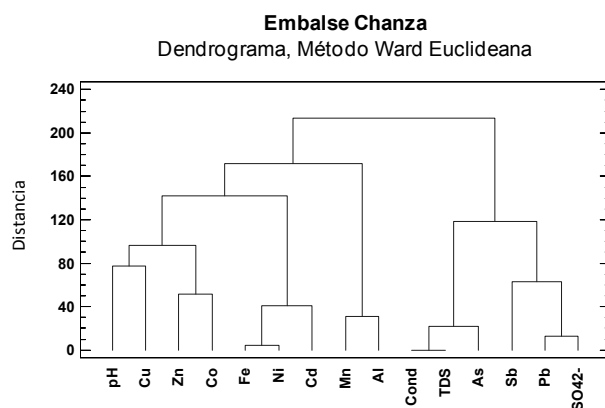
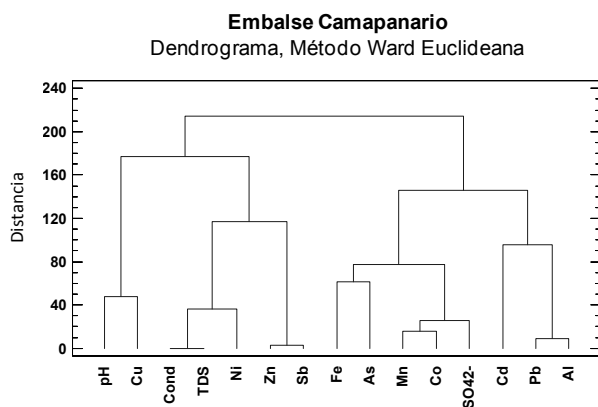
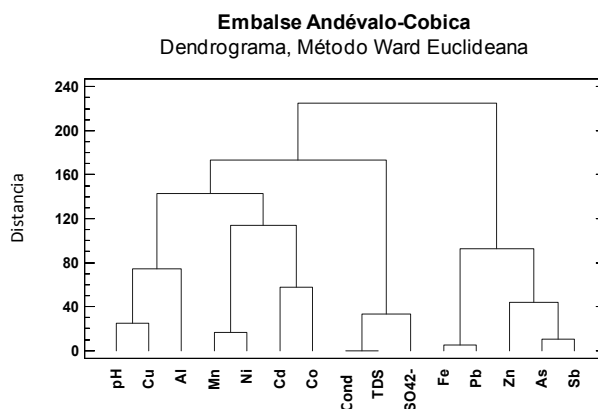
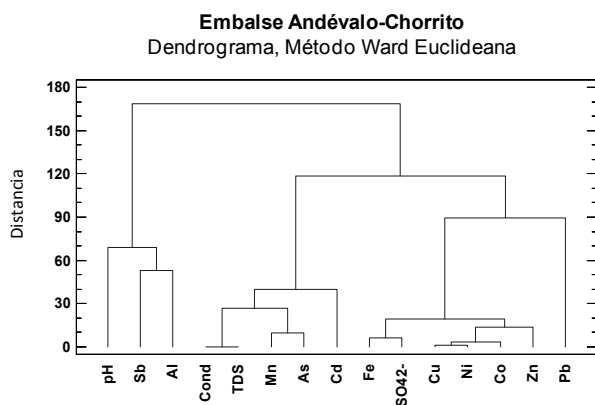
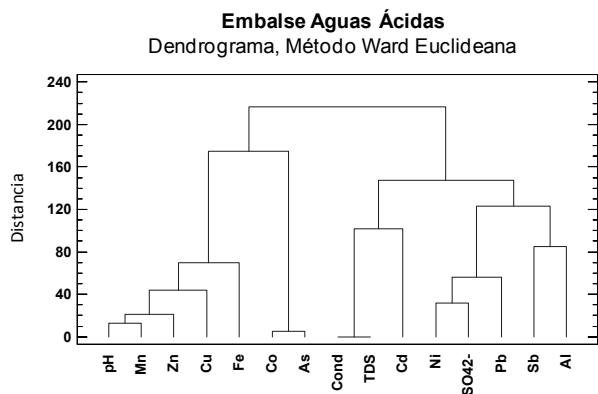
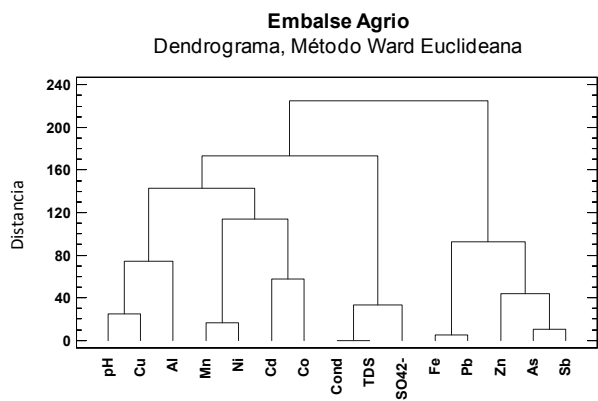
En los tres grupos definidos, además de las diferencias observadas en relación con el grado de influencia de los procesos AMD, también hay que considerar en éstas la incidencia de factores relacionados con la paragénesis mineral, cuenca vertiente y distancia al foco emisor, y también con la superficie afectada, tipo, intensidad y duración del proceso de tratamiento minero desarrollado en el área productora, así como la influencia del clima como principal agente de control (Santisteban *et al.*, 2013).

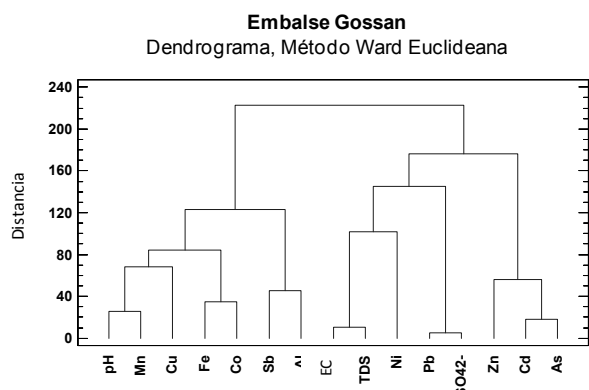
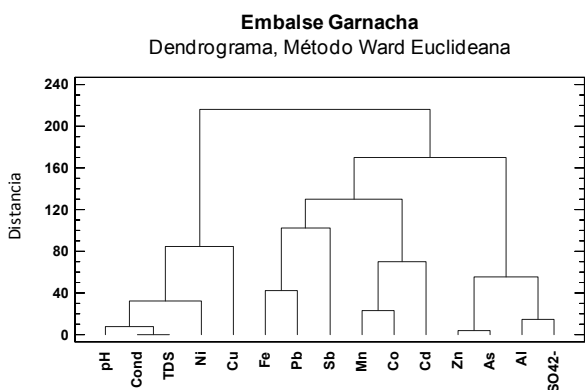
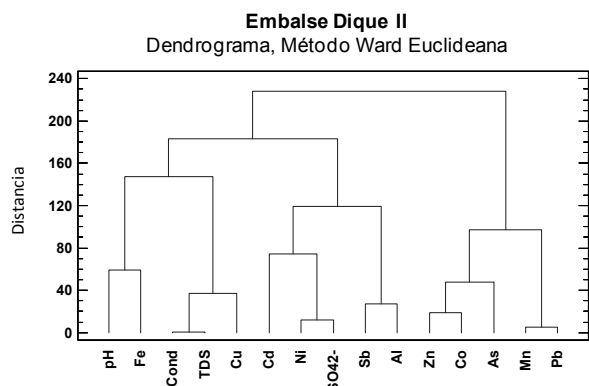
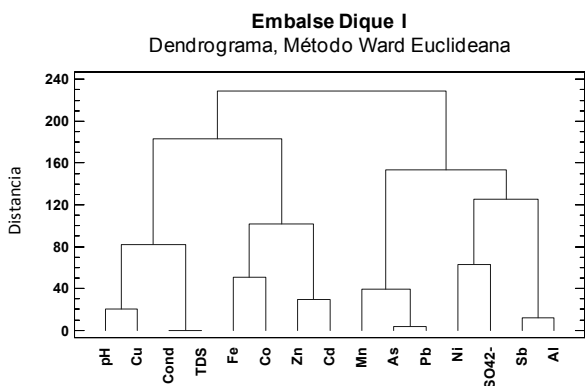
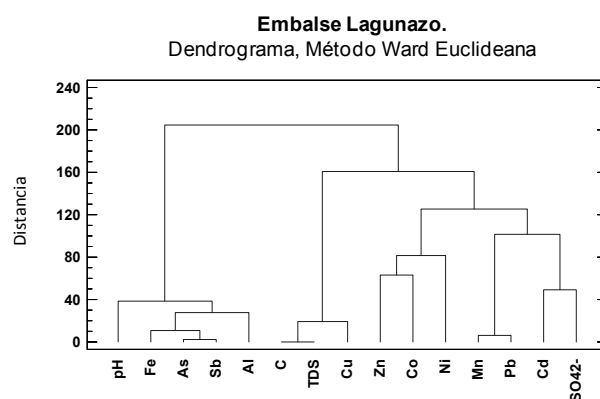
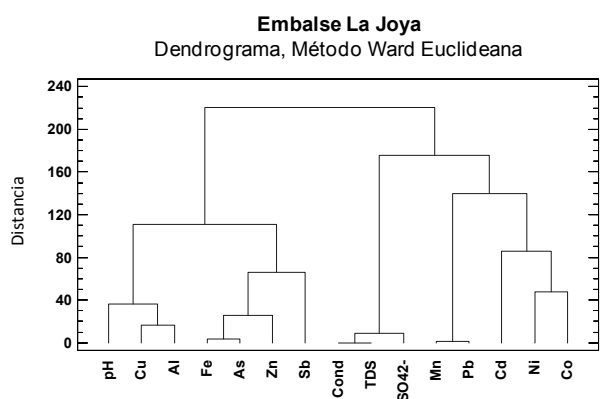
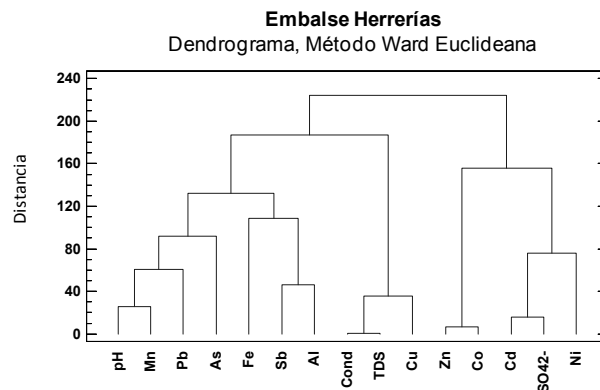
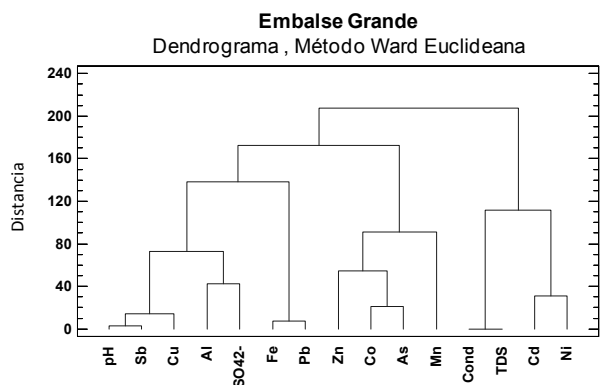
| Grupo 1 (pH<3) | Recuento | Promedio | Varianza | Mínimo | Máximo |
|--------------------------------------|----------|----------|--------------|---------|-----------|
| pH | 4 | 2,5 | 0,1 | 2,2 | 2,7 |
| Tª (°C) | 4 | 16,0 | 2,1 | 14,2 | 17,5 |
| Cond (µS/cm) | 4 | 3479,0 | 3171130,0 | 2088,1 | 6074,2 |
| TDS (mg/L) | 4 | 3176,5 | 4482730,0 | 1308,9 | 5849,3 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 4 | 1959 | 745586 | 1167 | 3086 |
| Fe (mg/L) | 4 | 657,9340 | 1167950,0000 | 15,7991 | 2265,8700 |
| Cu (mg/L) | 4 | 56,1820 | 10123,7000 | 2,3109 | 207,0500 |
| Zn (mg/L) | 4 | 55,5717 | 2388,5200 | 9,5027 | 111,5220 |
| Mn (mg/L) | 4 | 24,4026 | 147,5830 | 10,7061 | 35,2180 |
| Cd (mg/L) | 4 | 0,3099 | 0,0965 | 0,1101 | 0,7692 |
| Ni (mg/L) | 4 | 0,7492 | 0,1589 | 0,3908 | 1,2179 |
| Co (mg/L) | 4 | 3,2912 | 9,9142 | 0,6960 | 7,6425 |
| As (mg/L) | 4 | 0,5567 | 0,7712 | 0,0147 | 1,8533 |
| Sb (mg/L) | 4 | 0,0303 | 0,0028 | 0,0020 | 0,1096 |
| Pb (mg/L) | 4 | 0,5205 | 0,0082 | 0,3873 | 0,5898 |
| Al (mg/L) | 4 | 0,2807 | 0,0440 | 0,0582 | 0,4683 |
| Grupo 2 (pH 3-5) | Recuento | Promedio | Varianza | Mínimo | Máximo |
| pH | 6 | 3,7 | 0,3 | 3,1 | 4,7 |
| Tª (°C) | 6 | 16,6 | 1,2 | 15,0 | 17,7 |
| Cond (µS/cm) | 6 | 714,4 | 88363,1 | 300,6 | 1099,6 |
| TDS (mg/L) | 6 | 456,2 | 36539,4 | 189,4 | 704,2 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 6 | 332 | 19765 | 127 | 495 |
| Fe (mg/L) | 6 | 9,1273 | 175,7840 | 0,3968 | 34,8288 |
| Cu (mg/L) | 6 | 1,2553 | 0,8952 | 0,1204 | 2,3220 |
| Zn (mg/L) | 6 | 1,9112 | 1,6822 | 0,4753 | 3,8871 |
| Mn (mg/L) | 6 | 3,1870 | 3,6830 | 0,6525 | 6,4107 |
| Cd (mg/L) | 6 | 0,3877 | 0,2968 | 0,1094 | 1,4949 |
| Ni (mg/L) | 6 | 0,1034 | 0,0026 | 0,0457 | 0,1739 |
| Co (mg/L) | 6 | 0,1518 | 0,0164 | 0,0580 | 0,3847 |
| As (mg/L) | 6 | 0,0858 | 0,0206 | 0,0014 | 0,3696 |
| Sb (mg/L) | 6 | 0,0101 | 0,0002 | 0,0009 | 0,0367 |
| Pb (mg/L) | 6 | 0,3284 | 0,0006 | 0,2988 | 0,3636 |
| Al (mg/L) | 6 | 0,5280 | 0,0094 | 0,4300 | 0,6994 |
| Grupo 2 (pH >5) | Recuento | Promedio | Varianza | Mínimo | Máximo |
| pH | 13 | 5,8 | 0,1 | 5,0 | 6,7 |
| Tª (°C) | 13 | 17,0 | 3,8 | 13,1 | 19,6 |
| Cond (µS/cm) | 13 | 272,2 | 13072,9 | 141,7 | 559,5 |
| TDS (mg/L) | 13 | 179,4 | 5115,2 | 90,7 | 362,3 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 13 | 49 | 1879 | 2 | 137 |
| Fe (mg/L) | 13 | 0,4661 | 0,1316 | 0,1275 | 1,4436 |
| Cu (mg/L) | 13 | 0,2713 | 0,0958 | 0,0367 | 0,9405 |
| Zn (mg/L) | 13 | 0,1962 | 0,0059 | 0,0852 | 0,3814 |
| Mn (mg/L) | 13 | 0,6500 | 0,4120 | 0,1739 | 2,3555 |
| Cd (mg/L) | 13 | 0,1163 | 0,0014 | 0,0679 | 0,1792 |
| Ni (mg/L) | 13 | 0,0367 | 0,0003 | 0,0191 | 0,0774 |
| Co (mg/L) | 13 | 0,0384 | 0,0002 | 0,0120 | 0,0754 |
| As (mg/L) | 13 | 0,0133 | 0,0006 | 0,0012 | 0,0878 |
| Sb (mg/L) | 13 | 0,0138 | 0,0005 | 0,0007 | 0,0827 |
| Pb (mg/L) | 13 | 0,2976 | 0,0017 | 0,2452 | 0,3984 |
| Al (mg/L) | 13 | 0,3237 | 0,0136 | 0,1720 | 0,5600 |

Tabla 5.48. Sumario estadístico desglosado por grupos de pH.

Análisis cluster

A continuación, se muestran los dendrogramas generados a partir del análisis cluster de variables obtenidos de los datos procedentes de la toma de agua en la primera fase de muestreo en los puntos cola de los embalses (Figura 5.3).





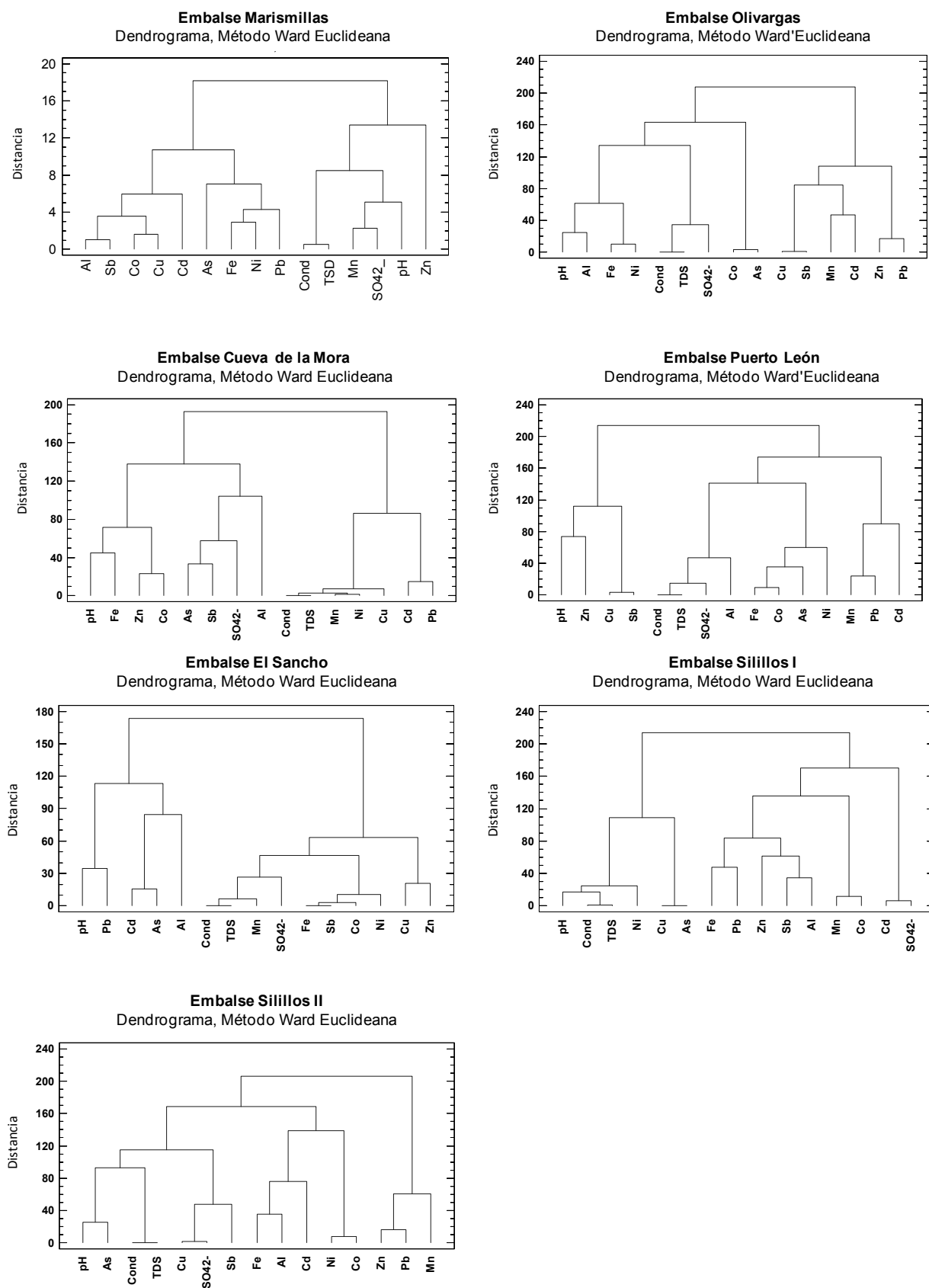


Figura 5.3. Dendrogramas de variables de los embalses objeto de estudio (Santisteban *et al.*, 2013).

Todos los clusters presentan dos grupos diferenciados, con escasa relación entre ellos para los diferentes puntos de muestreo. Tomando como ejemplo el embalse del Agrio se observan dos familias principales, aquella formada por el par Fe-Pb junto con el Zn, As y Sb, y otra familia en la que destacan las relaciones de proximidad entre la conductividad eléctrica y los TSD junto con los sulfatos, y las asociaciones entre el resto de variables.

Del mismo modo que para el análisis del sumario estadístico, las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6 presentan los dendrogramas para cada uno de los 3 grupos de embalses clasificados en base al valor de pH (Cerón *et al.*, 2013b).

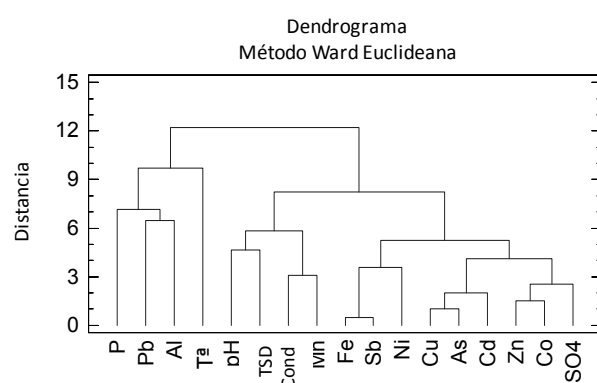


Figura 5.4. Dendrograma de variables del Grupo 1 (Cerón *et al.*, 2013b).

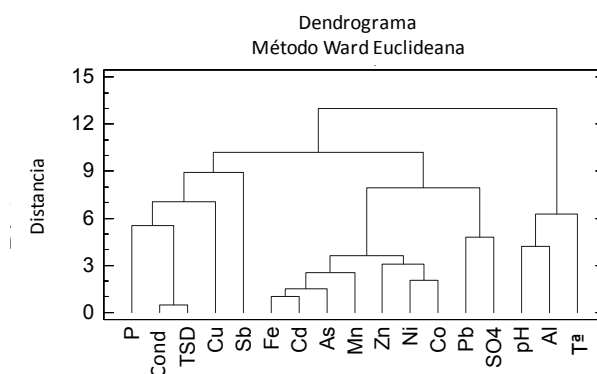


Figura 5.5. Dendrograma de variables del Grupo 2 (Cerón *et al.*, 2013b).

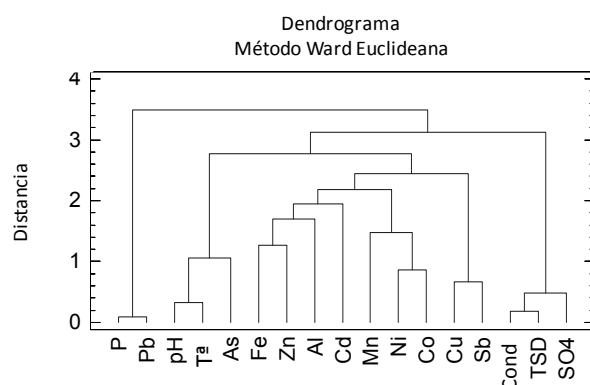


Figura 5.6. Dendrograma de variables del Grupo 3 (Cerón *et al.*, 2013b).

Si atendemos a los clusters de variables para los tres grupos definidos, se puede ver como en el Grupo 1 (Figura 5.4) se muestran dos agrupaciones principales: el primero reúne a la precipitación, Pb, Al, y temperatura, y el segundo, formado a su vez por dos subgrupos, uno, donde se observa la proximidad entre el pH, TSD, conductividad eléctrica y Mn, y por otro lado al resto de variables.

En el Grupo 2 (Figura 5.5) se observa una asociación de variables según tres clusters principales: el primero reúne a la precipitación, conductividad eléctrica, TSD, Cu y Sb; el segundo al pH, Al y temperatura; y el tercero al resto de las variables.

Finalmente, en el Grupo 3 (Figura 5.6), se distinguen dos subclusters diferentes: el primero formado por la agrupación precipitación-Pb; y el segundo constituido por cuatro subgrupos, donde se agrupan, por un lado, pH-temperatura-As; conductividad eléctrica-TSD-sulfatos; Cu-Sb; y por otro lado se agrupan el resto de variables.

En el clúster de variables del Grupo 1 (Figura 5.4), la proximidad de los iones al grupo formado por conductividad, TSD y pH, se puede explicar por el control que ejerce el pH en la disolución de muchos de los metales. Por otra parte, y ante la ausencia de cloruros, son los sulfatos quienes más directamente controlan el valor que toma la conductividad. La separación de la precipitación del grupo principal de variables indica que ésta no es la que ejerce el control principal de la disolución de iones.

Con respecto al clúster de variables del Grupo 2 (Figura 5.5), la proximidad del grupo de iones al grupo formado por la precipitación, conductividad y TSD, indica que es la precipitación quien controla principalmente su disolución. En este caso, la separación

del pH de los dos grupos anteriores de variables señala una menor influencia en la disolución de iones.

Finalmente, en el clúster de variables del Grupo 3 (Figura 5.6) el pH aparece unido al grupo formado por los metales, mostrando el control que ejerce sobre éstos. Sin embargo, separados de este grupo se encuentran la conductividad, TSD y sulfatos, indicando que son éstos quienes más directamente controlan el valor que toma la conductividad. Los valores de conductividad del Grupo 3, muchos más bajos que los del Grupo 1 y 2 (Tabla 5.46), se interpretan por el hecho de que a medida que nos alejamos del foco emisor, el pH irá aumentando y con ello disminuirá la capacidad de disolución del agua en cada punto. La unión de la precipitación a los dos grupos anteriores, muestra el control que ejerce ésta en la disolución y/o redisolución de iones previamente precipitados.

La aplicación del análisis clúster de variables para la caracterización de los embalses se muestra como una herramienta muy útil para determinar la asociación existente entre los parámetros físico-químicos en cada uno de los embalses estudiados, así como la relación hidroquímica existente en cada grupo definido.

La inexistencia de un patrón de comportamiento global para todos los embalses analizados puede ser interpretada como consecuencia de la coexistencia de paragénesis minerales muy diferentes a lo largo de la Faja Pirítica Ibérica, en contraposición a la litología homogénea del encajante en el dominio de referencia. Estas grandes diferencias paragenéticas y con ello mineralógicas, unidas a la diversidad de tamaños y naturaleza ecológica de las cuencas vertientes y a otros factores como pueden ser la superficie afectada, tipo, intensidad y duración del proceso de tratamiento minero desarrollado en el área productora en estudio, podrían provocar la falta de homogeneidad en las condiciones físico-químicas del medio, lo que conduciría al desarrollo de reacciones que provocarían la presencia en disolución de los diferentes elementos analizados y por consiguiente, la llegada de aportes contaminados por diferentes paragénesis minerales con muy distintos niveles de afección y controlados esencialmente por los aportes limpios que provocan dilución.

Análisis gráfico

Para el estudio mediante análisis gráfico de los datos de aguas tomados en los puntos cola de los embalses, se ha tomado como base la propuesta metodológica de Grande

(2011). La gráfica representada en la Figura 5.7 muestra el porcentaje de embalses que superan el límite establecido por la Directiva 75/440/CEE (Tabla 5.49).

| Directiva 75/440/CEE | |
|----------------------|-------------------|
| Parámetro | Valor paramétrico |
| Antimonio (Sb) | 0,005 mg/L |
| Arsénico (As) | 0,01 mg/L |
| Aluminio (Al) | 0,2 mg/L |
| Cadmio (Cd) | 0,005 mg/L |
| Cobre (Cu) | 2 mg/L |
| Hierro (Fe) | 0,2 mg/L |
| Manganeso (Mn) | 0,05 mg/L |
| Níquel (Ni) | 0,02 mg/L |
| Plomo (Pb) | 0,01 mg/L |
| Conductividad | 2500µS/cm a 20° C |
| Sulfatos | 250 ppm |

Tabla 5.49. Valores paramétricos máximos admisibles por la Directiva 75/440/CEE para la calidad del agua de abastecimiento público.

Se observa como todos los embalses estudiados superan la normativa para el Mn, Cd y Pb; un 96% de los embalses están por encima del límite establecido para el Fe; para el Sb el 48% de los embalses superan dicho límite; el 35% superan la norma para los sulfatos; un 30% lo hace para el As mientras que para el Cu y la conductividad eléctrica sólo el 26% y 13%, respectivamente, están por encima del límite máximo permitido.

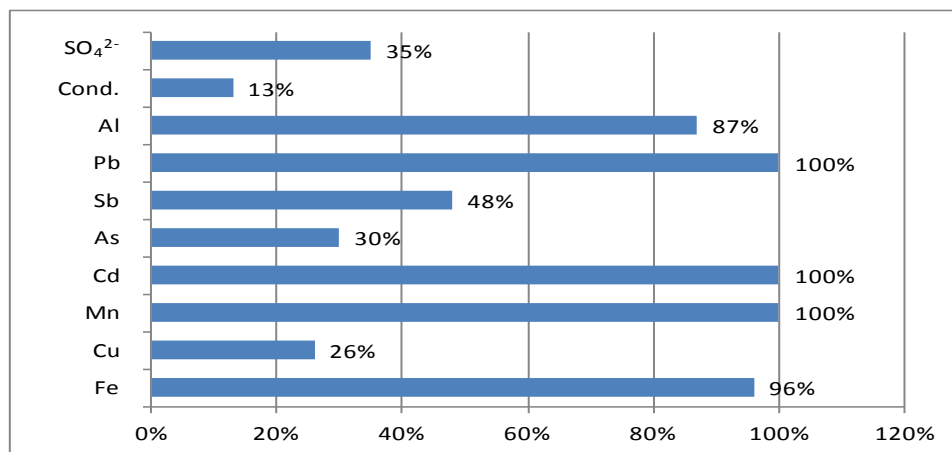


Figura 5.7. Porcentaje de embalses que superan la Directiva 75/440/CEE para los diferentes contaminantes en estudio (Grande *et al.*, 2013b).

Para cada elemento se ha definido el número de embalses enmarcado dentro de cada índice de contaminación definido por Grande (2011) (Figura 5.8).

Para el Fe, solo un embalse no supera los límites dictados por la normativa, quedando enmarcado dentro del valor ponderado "0" en el que la contaminación se considera nula (Grande, 2011). Dentro de este mismo rango se encuentran 17 embalses que no presentan afección para el Cu, 16 embalses respecto al As, 12 embalses que no superan los límites permitidos para el Sb, 3 embalses respecto al Al, para la conductividad eléctrica se observan 20 embalses que están por debajo del máximo permitido y 15 embalses que no superan la normativa para los sulfatos. Para el Mn, Cd y Pb todos los embalses superan la normativa.

Con contaminación baja (valor ponderado "1") solo se observan 2 embalses que presentan este grado de afección para el Fe, y solo 1 embalse para el Al. En el resto de parámetros no se observan embalses con este nivel de contaminación.

Dentro del grado de contaminación moderada (valor ponderado "2") se observan 4 embalses con esta distinción respecto al Fe, 3 embalses quedan dentro de este rango para el Cu, 8 embalses para el Al, 2 embalses presentan afección moderada para la conductividad eléctrica y 4 embalses para los sulfatos.

El valor ponderado "3" marca una afección de tipo media. Se observan 8 embalses con este nivel de contaminación para el Fe, 2 embalses para el Cu, 9 embalses para el Mn, 4 embalses para el As, 10 embalses para el Sb, 11 embalses para el Al, y solo 1 embalse para la conductividad eléctrica y los sulfatos.

Dentro del rango de contaminación alta destacan el Cd y Mn que presentan 20 embalses con este valor ponderado de 4. Para el Fe se encuentran 2 embalses dentro de este grado de afección, 6 embalses para el Mn, 2 embalses para el As, y solo 1 embalse para el Sb y los sulfatos. En el resto de parámetros no se han observado embalses con este nivel de contaminación.

El valor ponderado "5" marca una contaminación extremadamente alta en la que destacan 6 embalses con este grado de afección para el Fe, solo 1 embalse que supera en 50 veces la normativa para el Cu, 8 embalses con un valor extremadamente alto de contaminación para el Mn, 3 embalses para Cd, 1 embalses para el As y para el Pb, 3 embalses quedan dentro de este rango. El Sb, la conductividad eléctrica y los sulfatos no provocan contaminación extremadamente alta sobre ningún embalse.

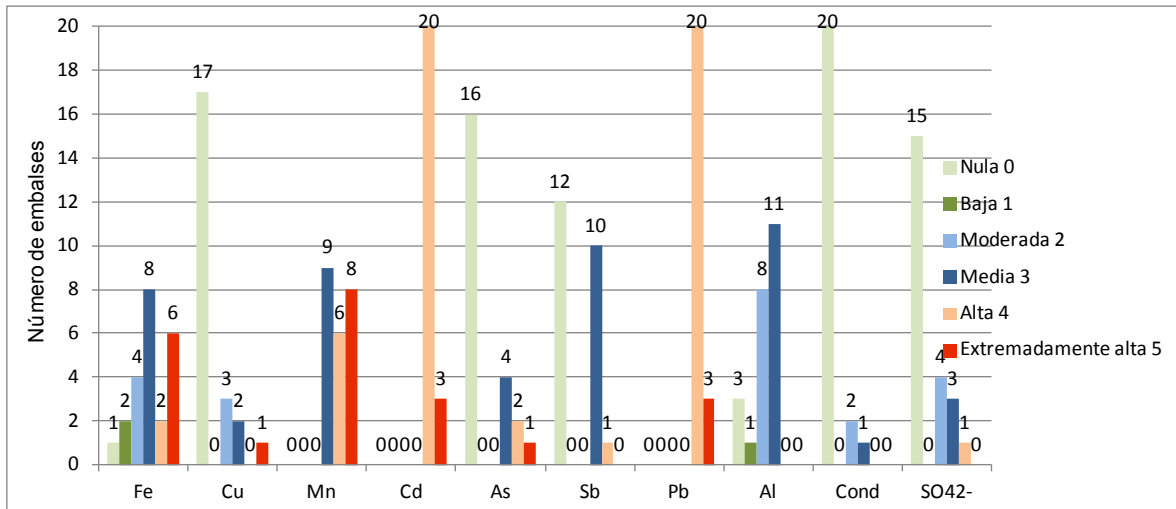


Figura 5.8. Representación del grado de afección de los embalses (Grande *et al.*, 2013b)

La propuesta metodológica empleada permite definir con precisión el grado de afección de las aguas embalsadas y formular un mapa de riesgos regional, representado en la Figura 5.9, donde se pueden observar diagramas radiales en los que se representa el número de veces que cada elemento supera los límites permitidos para cada embalse.

En general, se puede decir que todos los embalses superan las concentraciones mínimas establecida por la Directiva 75/440/CEE en la mayoría de los parámetros determinados, destacando el Mn, Cd, Pb, Fe y Al por presentan los porcentajes más altos de superación. El resto de parámetros medidos en los diferentes embalses también se encuentran por encima de los niveles mínimos establecidos, pero en porcentajes menores.

De forma particular, cada embalse presenta un rango de afección distinto según la comparativa establecida con el modelo de Grande (2011) lo que es interpretado como consecuencia de la gran heterogeneidad y dispersión geográfica de los embalses estudiados, perteneciendo cada uno de ellos a cuencas hidrográficas diferentes, cada una de ellas con características particulares, estando sometidos por consiguiente a la llegada de aportes contaminados por diferentes paragénesis minerales y con muy distintos niveles de afección controlados esencialmente por los aportes limpios que provocan dilución (Grande *et al.*, 2013 b).

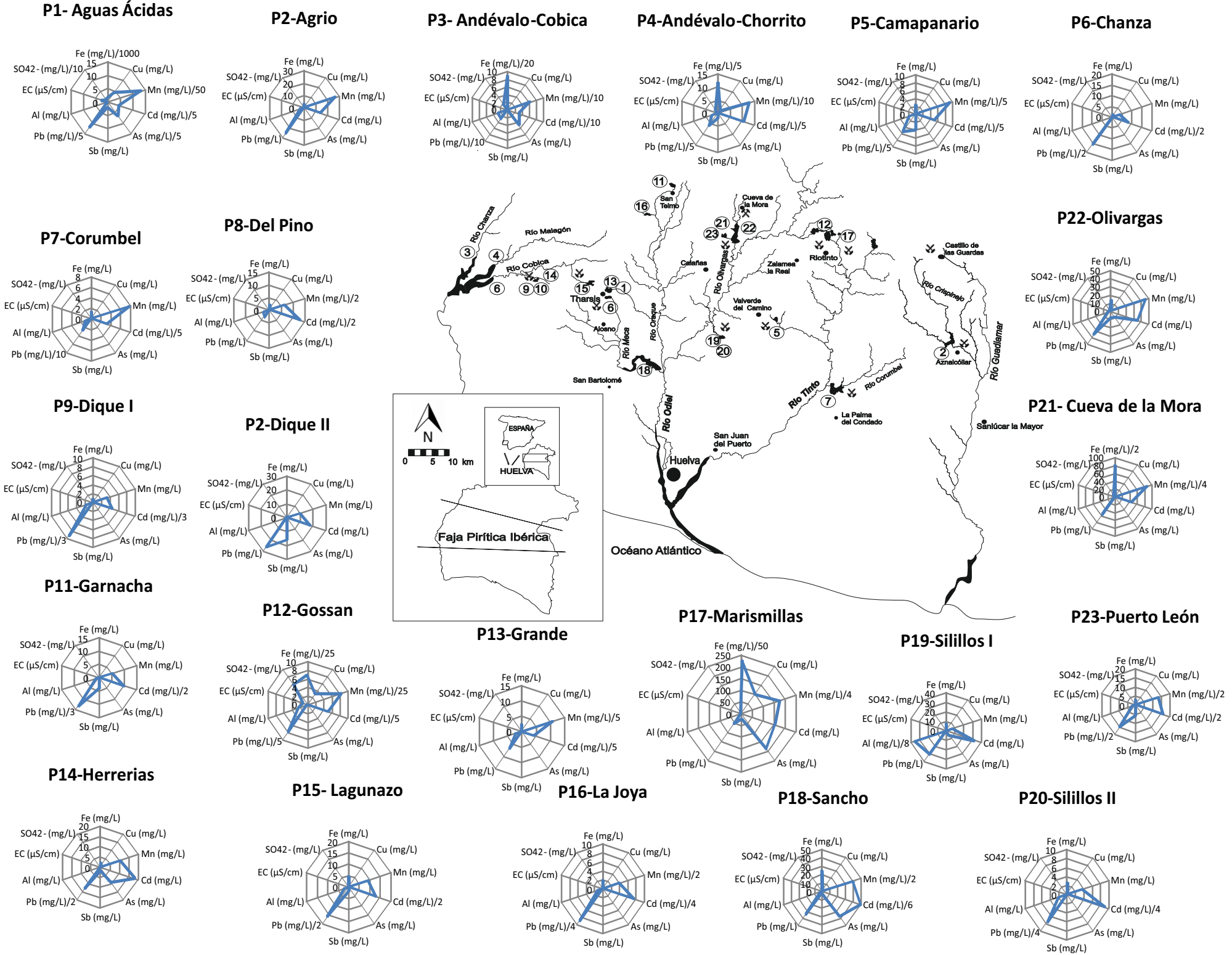


Figura 5.9. Mapa de afección basado en la Directiva 75/440/CEE para los diferentes embalses muestreados (Grande *et al.*, 2013b)

5.3.1.1.1. Conclusiones derivadas del estudio de las muestras obtenidas en el muestreo bimensual en todos los embalses objeto de estudio

El estudio de los parámetros obtenidos en las muestras de agua tomadas en todos los embalses, ha revelado que todos los embalses presentan afección, en mayor o menor medida, por procesos AMD, superando todos ellos los límites de calidad de agua establecidos por la Directiva 75/440/CEE. Los embalses más afectados por estos procesos son Marismillas, Aguas Ácidas, Gossan, Andévalo-Cobica, Andévalo-Chorrito, Cueva de la Mora, Sancho y Olivargas, en los que destacan los altos valores de Mn, Cd, Pb, Fe y Al. El resto de parámetros medidos en los diferentes embalses también se encuentran por encima de los niveles mínimos establecidos, aunque en porcentajes menores (Grande *et al.*, 2013b).

De forma particular, cada embalse presenta un rango de afección distinto, no existiendo ningún patrón de comportamiento global, a excepción del impuesto por los valores de pH sobre las concentraciones de sulfatos y metales. En algunos casos es el pH el que ejerce el control de la disolución de la mayoría de los metales, siendo los sulfatos los que controlan el valor de la conductividad. En otros, es la precipitación la que se muestra como la principal variable que controla la disolución y/o redisolución de iones previamente precipitados siendo menor la influencia del pH (Cerón *et al.*, 2013b).

Esta inexistencia de un eje común puede ser interpretada como consecuencia de la coexistencia de paragénesis minerales muy diferentes a lo largo de la Faja Pirítica Ibérica, así como la diversidad de tamaños y naturaleza ecológica de las cuencas vertientes y a otros factores tales como la superficie afectada, tipo, intensidad y duración del proceso de tratamiento minero desarrollado en el área productora en estudio (Santisteban *et al.*, 2013).

El contraste entre valores extremos, puede deberse por un lado, a la falta de homogeneidad de las condiciones físico-químicas del medio que provocarían diferencias en la presencia en disolución de los diferentes elementos analizados y por consiguiente, la llegada de aportes contaminados por diferentes paragénesis minerales, con muy distintos niveles de afección. También debe ser considerada la proximidad al foco emisor de AMD, y por otro lado, el efecto tampón que se origina por la mezcla de aguas contaminadas con aguas limpias. A su llegada a los embalses, estas aguas ácidas experimentan un violento aumento de pH, lo que provocaría la

precipitación en el propio embalse de la mayor parte de la carga metálica transportada por el cauce minero acumulándose en su lecho (Santisteban *et al.*, 2013).

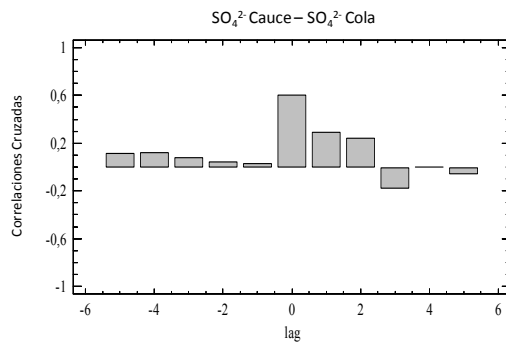
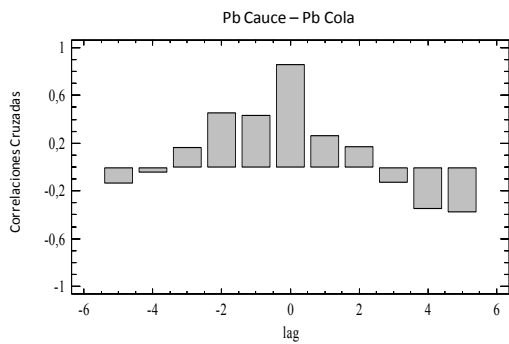
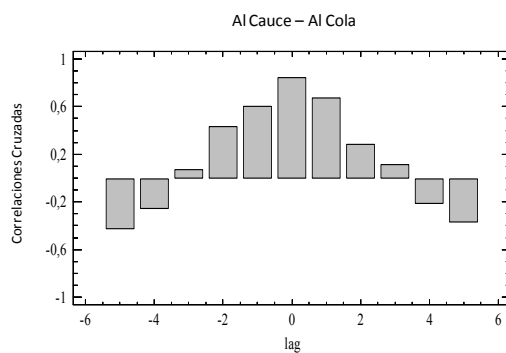
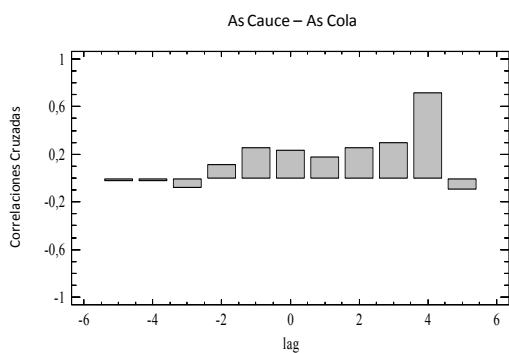
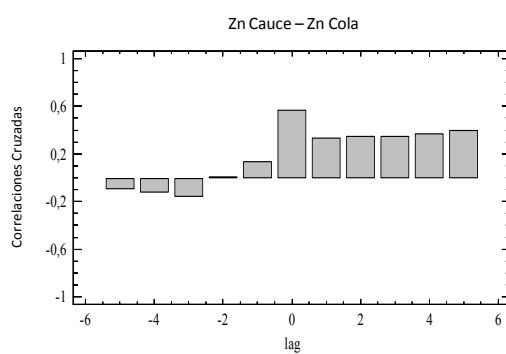
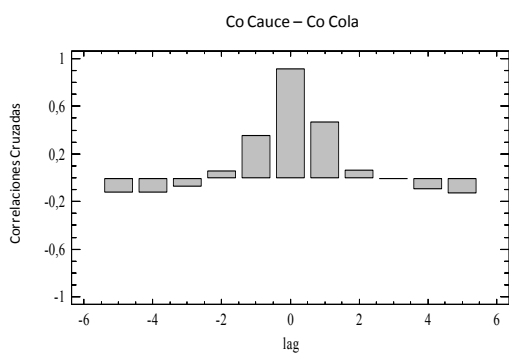
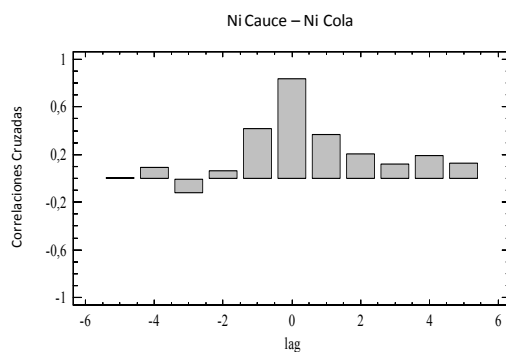
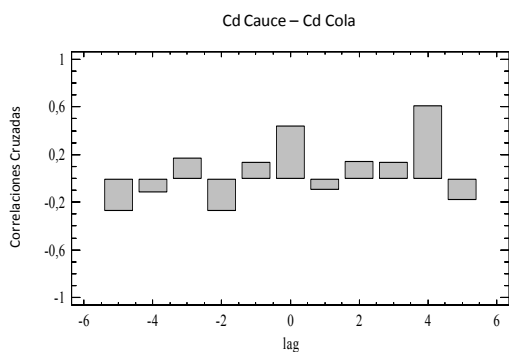
5.3.1.2. Muestreo de agua bimensual en el embalse Sancho durante todo el año hidrológico (Masa 1)

Para el estudio de los datos procedentes del muestreo bimensual realizado durante la primera campaña de muestreo en el embalse El Sancho, se han aplicado funciones de correlación cruzada y series temporales.

De este estudio resulta el trabajo de de la Torre *et al.*, (2014a).

Funciones de correlación cruzada

Para el embalse El Sancho se presentan los resultados de las funciones de correlación cruzada (Figura. 5.10) entre pares de variables, medidas en el punto cola y en el punto cauce.



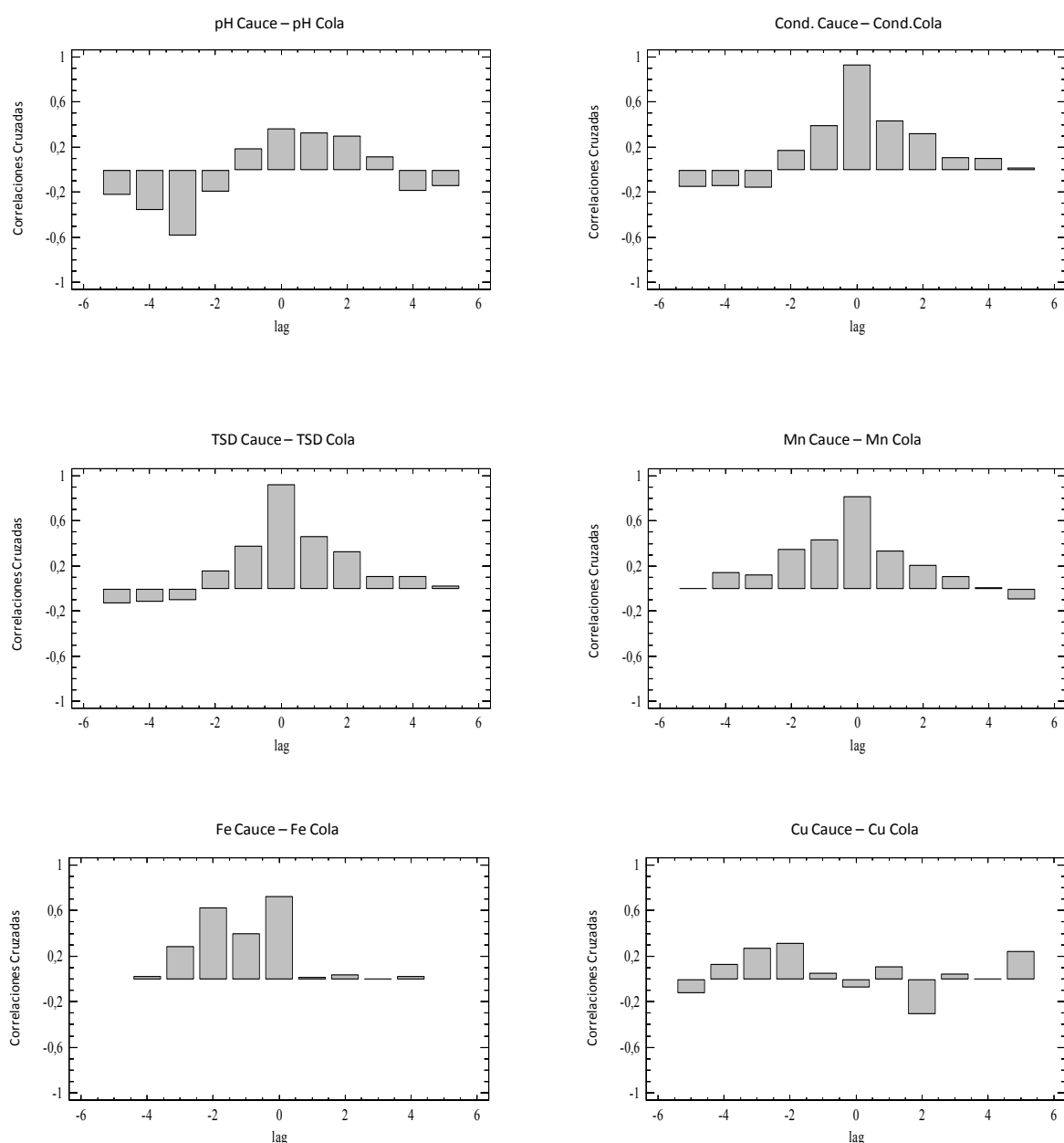


Figura 5.10. Funciones de correlación cruzada entre pares de variables analizados en los puntos cola y cauce del embalse El Sancho (Lag: 15 días) (de la Torre *et al.*, 2014a).

Si se observan los gráficos de correlación cruzada se puede constatar como tanto el pH, conductividad, TSD, Fe, Zn, Mn, Ni, Co, As, Sb, Pb, Al y los sulfatos se encuentran muy relacionados en ambos puntos, con correlaciones máximas por encima de 0,6, produciéndose este máximo de correlación en un tiempo $t=0$ (menor de 15 días) en todos los casos, excepto en el del As en el que tiene un retardo de 60 días, es decir, el aumento o disminución de las concentraciones de este elemento en el punto cauce, se

refleja en aumentos o disminuciones en el punto cola 60 días después. De una forma general, el resto de parámetros correlan de un forma discreta.

Esta estrecha relación entre las concentraciones entre los dos puntos, con un $t=0$, es debido a la pequeña distancia que existe entre ambos puntos (unos 300 metros), lo que implica que aumentos o disminuciones de un parámetro en el punto cauce, tiene su consecuencia, prácticamente inmediata en el punto cola.

Además, la oxidación de Fe(II) a Fe(III) tiene lugar en todas las aguas ácidas después de un lapso de tiempo de entre 1 y 2 semanas (Sánchez-España *et al.*, 2006), coincidente con el tiempo entre muestreos. Además, el retardo de 60 días entre puntos cola y cauce para el As se debe, posiblemente, a la reducción de As cerca de su fuente por fijación en fases minerales secundarias, como los oxihidroxidos de hierro. La remoción de As(V) se debe a la coprecipitación con la schwertmannita (mediante el desplazamiento del SO_4^{2-} estructural en la schwertmannita) y a la adsorción posterior a la precipitación (mediante una vía de intercambio con el SO_4^{2-}). Regenspurg y Peiffer (2005) han descrito sustituciones importantes de sulfato por arseniato en la schwertmannita lo que valida esta hipótesis. Asimismo, a pH bajo, las soluciones ácidas se encuentran saturadas en minerales de hierro como es jarosita, goethita y schwertmannita, aunque es normalmente la schwertmannita el mineral que preferentemente precipita entorno a pH 3,5 y condiciones de potencial redox alto ($E_h > 700$ mV) (Sánchez-España *et al.*, 2006; Valente *et al.*, 2012a).

En síntesis, la función de correlación cruzada se revela como una herramienta eficaz para el establecimiento de relaciones de temporalidad causa-efecto entre parámetros hidroquímicos antes y después de su incorporación al embalse, así como la determinación de los tiempos de respuesta ante el estímulo inducido por las precipitaciones, lo que puede resultar de interés para su aplicación a otros embalses con afecciones similares.

Series temporales

Para visualizar el funcionamiento hidroquímico entre el punto cola y el punto cauce en el embalse El Sancho, en la siguiente figura (Figura 5.11) se muestran los gráficos de evolución temporal. En cada uno de ellos se ha representado la lluvia en la parte izquierda del eje Y, junto con un parámetro de punto cauce y punto cola, ambos en la parte derecha del eje Y.

Se observa como en todos los casos la línea que representa la evolución temporal del parámetro del punto cauce se encuentra por encima del punto cola, a excepción del pH en que es al contrario. En cauce, a lo largo de toda la campaña, los valores son siempre más ácidos que en cola. También se puede observar que en la mayor parte de las gráficas (Conductividad, TSD, Fe, Zn, Mn, Ni, Co, Sb y sulfatos) se produce un aumento en la concentración de estos parámetros, similar en cauce y cola, a partir de la semana 11, teniendo lugar, en la semana 16, un aumento brusco de concentración, tanto de cauce como de cola coincidentes con un pico de lluvia.

En relación con este aumento de las concentraciones de algunos parámetros a partir de la semana 11, que coincide con una disminución del pH, según Sánchez-España *et al.*, (2006), los complejos iónicos metal-sulfatos son las formas disueltas dominantes en las que el Fe(III) y Al(III) están presentes en las soluciones a pH bajo, con presencia muy leve o insignificante de los complejos iónicos que contienen grupos hidroxilos. A medida que el pH aumenta, los iones sulfatados son menos abundantes y son reemplazados progresivamente por las formas de hidróxido (por ejemplo, $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}_3(\text{OH})_4^{5+}$). Los cationes metálicos divalentes (Mn^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+}) pueden estar presentes ya sea como iones libres en fases acuosas o como especies de sulfatos. Este cambio de tendencia en la semana 11, consecuencia de la disminución del pH a partir de esa fecha, tiene lugar por el esponjamiento de las escombreras. Las lluvias que tienen lugar al principio de la campaña, cargan la escombrera (de la Torre *et al.*, 2014).

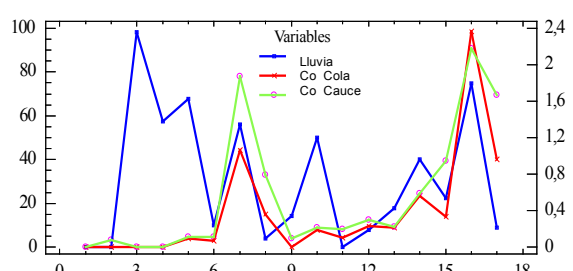
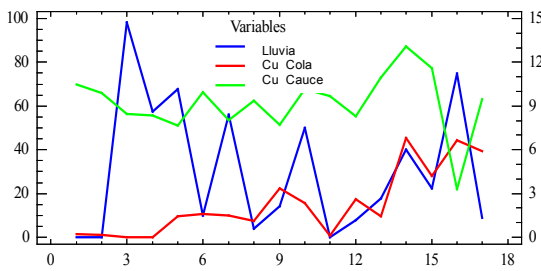
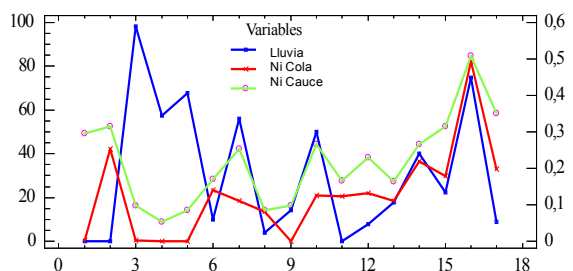
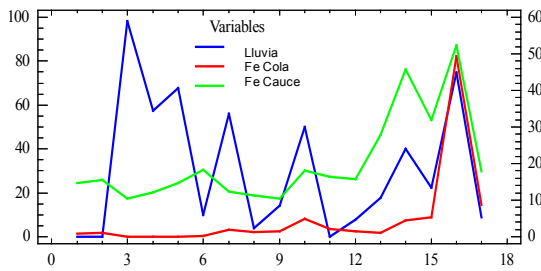
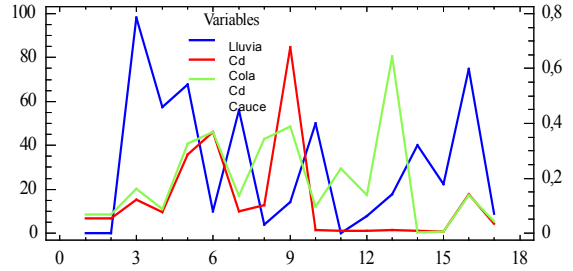
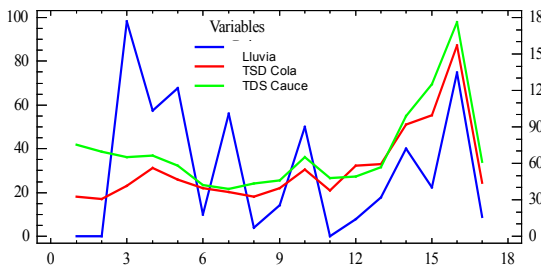
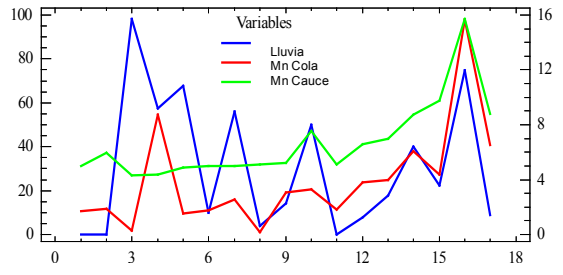
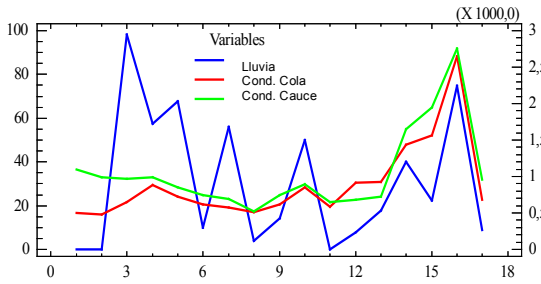
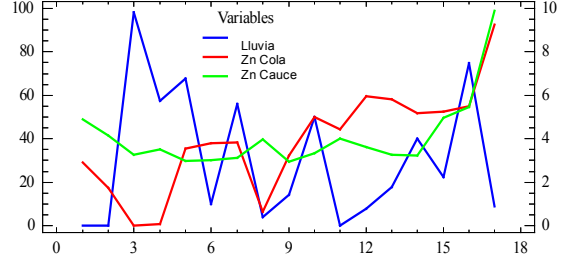
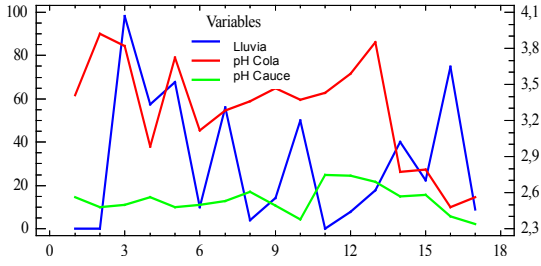
Se observa una disrupción de la descarga de los lixiviados producidos por la lluvia en tres etapas. En un corto periodo de tiempo, con una respuesta menor que un día y una duración menor que una semana, las tasas de flujo se incrementan rápidamente, así como el aporte de sólidos en suspensión, sólidos disueltos, sulfatos y metales pesados. Los procesos de dilución y drenaje tienen lugar en esta primera etapa.

La concentración de sólidos en suspensión incrementa, al tiempo que disminuye la concentración de sólidos en disolución. Los sulfatos y el Zn se comportan como los sólidos disueltos. Las concentraciones de Cu y Fe se comportan como los sólidos en suspensión. En la segunda etapa, de duración variable, se produce la descarga de lixiviados, con un sucesivo descenso en la tasa de flujo. Esta etapa depende de las características de la escombrera, la cantidad y distribución de las lluvias y de las condiciones hidrológicas que tienen lugar cuando se producen las precipitaciones. Durante esta etapa, la disminución en las tasas de flujo está acompañada por un descenso en los contaminantes.

Por otro lado, la concentración de los sólidos disueltos, sulfatos y Zn en los lixiviados emitidos, presentan un incremento en la misma proporción en las que la tasa de flujo decrece. A veces, este aumento es tan grande que, para las mismas velocidades de flujo, la concentración de los contaminantes después de las lluvias podría ser más alta que antes de la lluvia. El Cu y Fe continúan descendiendo durante un corto periodo de tiempo, pero luego sufren un aumento similar al del Zn.

En un escenario a largo plazo, los vertidos de lixiviados pueden continuar incluso meses después desde la última precipitación. Las escombreras, consideradas como un sistema, presentan un efecto "memoria" de la precipitación que tiene lugar durante todo el año, produciendo vertidos de lixiviados de acuerdo a la cantidad de agua de lluvia acumulada. Esta tercera etapa no puede ser atribuida a precipitaciones individuales (Sainz *et al.*, 2002). Se debe tener en cuenta que el río Meca no es medio generador, sino que son aguas evolucionadas. Los valores de carga metálica en medio generador son unas 100 veces mayores (Grande *et al.*, 2010a).

CAPITULO 5: RESULTADOS, DISCUSION Y CONCLUSIONES PARCIALES OBTENIDAS MEDIANTE TRATAMIENTO GRAFICO-ESTADISTICO Y LOGICA BORROSA



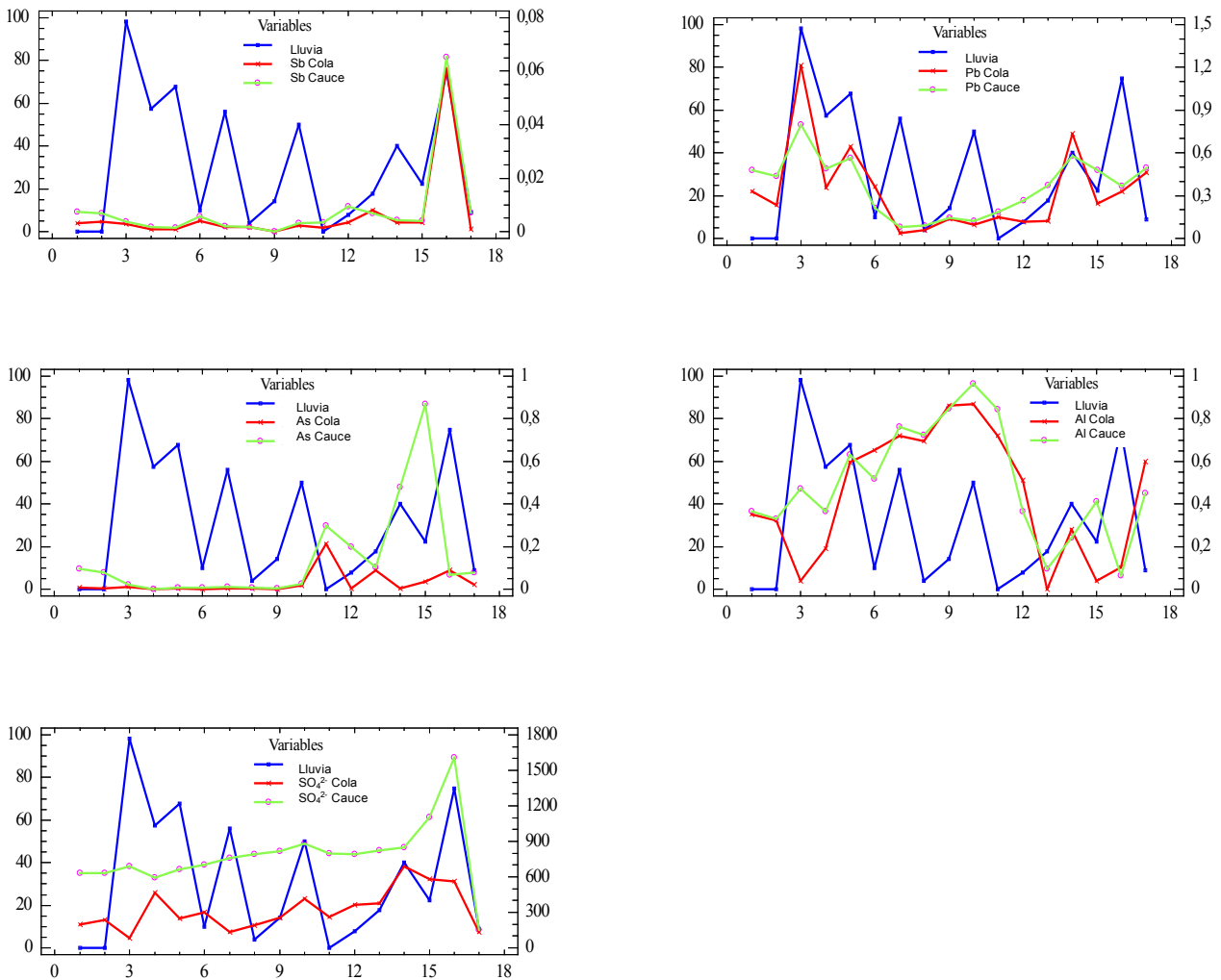


Figura 5.11. Series temporales de los parámetros analizados en los puntos cola y cauce del embalse El Sancho (de la Torre *et al.*, 2014a).

5.3.1.2.1. Conclusiones derivadas del estudio de las muestras tomadas en el muestreo bimensual en el embalse El Sancho

Todos los parámetros determinados en el punto cauce y en el punto cola del embalse El Sancho se encuentran estrechamente relacionados entre sí, presentando altos valores de correlaciones en un tiempo inferior a 15 días, a excepción del As que presenta un retardo de 60 días, posiblemente como consecuencia de la rápida eliminación de As cerca de su fuente por adsorción en óxidos de hierro hidratados.

Esta estrecha relación entre la mayor parte de parámetros de ambos puntos de muestreo, es debida a la pequeña distancia que existe entre ambos puntos (unos 300 metros), lo que implica que aumentos o disminuciones de un parámetro en el punto cauce, tiene su consecuencia, prácticamente inmediata, en el punto cola.

A lo largo de todo el muestreo, para todos los parámetros se observa una mayor concentración de contaminantes en el punto cauce que en el punto cola. Durante el principio de la campaña se produce un pequeño ascenso del pH, en ambos puntos, invirtiéndose a partir de la semana 11 y una disminución más brusca en la semana 16. Este ascenso inicial, coincide con la reducción en la concentración de metales pesados, que sin embargo comienzan a aumentar a partir de la semana 11 y con un aumento brusco en la semana 16. Todo este comportamiento temporal es consecuencia de la descarga de las escombreras de minas de Tharsis que al inicio de la campaña descargan el máximo volumen de agua, consecuencia de las primeras lluvias, y al avanzar la campaña va disminuyendo el caudal pero aumentando la concentración de metales pesados y la acidez (de la Torre *et al.*, 2014a).

5.3.1.3. Muestreo de agua en profundidad llevado a cabo, de manera puntual, en la presa del embalse El Sancho (Masa 2)

Para el estudio de los datos obtenidos en el muestreo a diferentes profundidades realizado en el embalse El Sancho en el primer año hidrológico, se han llevado a cabo los siguientes tratamientos grafico-estadísticos: sumario estadístico, análisis factorial, gráficos de evolución en profundidad y análisis cluster.

Como consecuencia del estudio de los resultados de este muestreo, han sido publicados diferentes trabajos: Valente *et al.*, (2012b); Grande *et al.*, (2014a) y Cerón *et al.*, (2013a).

Sumario estadístico

En la Tabla 5.50 se muestra el sumario estadístico de las variables obtenidas en el muestreo en profundidad realizado en la presa del embalse El Sancho. No se muestran los datos de As y Co ya que en todas las muestras estuvieron por debajo del límite de detección.

| | Media | Varianza | Mínimo | Máximo |
|---------------------------------------|--------|-----------|--------|--------|
| pH | 3,9 | 0,2 | 3,5 | 4,6 |
| Cond. ($\mu\text{S/cm}$) | 441,6 | 279,2 | 401,0 | 472,0 |
| T ^a ($^{\circ}\text{C}$) | 22,4 | 20,1 | 14,6 | 25,8 |
| TSD (mg/L) | 283,0 | 115,8 | 257,0 | 302,0 |
| OD (mg/L) | 3,79 | 55108,00 | 0,16 | 6,16 |
| Fe (mg/L) | 0,7500 | 0,0250 | 0,5400 | 1,1600 |
| Al (mg/L) | 0,0100 | 0,0029 | 0,0120 | 0,2000 |
| Cd (mg/L) | 0,1300 | 0,0000 | 0,1080 | 0,1470 |
| Cu (mg/L) | 0,6300 | 0,0076 | 0,4180 | 0,8070 |
| Mn (mg/L) | 1,4800 | 0,0140 | 1,0800 | 1,6800 |
| Ni (mg/L) | 0,0100 | 6,609 E-8 | 0,0090 | 0,0100 |
| Pb (mg/L) | 1,0200 | 0,1300 | 0,2700 | 1,9100 |
| Sb (mg/L) | 0,0020 | 5,196 E-7 | 0,0012 | 0,0034 |
| Zn (mg/L) | 2,2700 | 0,1288 | 1,4900 | 2,7300 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 182 | 91 | 170 | 199 |

Tabla 5.50. Sumario estadístico de las variables analizadas en las muestras obtenidas a diferentes profundidades en el embalse El Sancho (Grande *et al.*, 2014a).

El estudio hidrogeoquímico de las aguas del embalse El Sancho, receptor de aportes de AMD provenientes de las actividades mineras de la cuenca del río Meca, muestra valores medios de sulfatos y conductividad eléctrica relativamente altos, y de pH bajos (182 mg/L, 441,6 $\mu\text{S/cm}$ y 3,9, respectivamente). En relación con la carga metálica, destacan entre otros los valores alcanzados por el Fe, Mn, Zn, Pb y Cu (0,75 mg/L, 1,48 mg/L, 2,27 mg/L, 1,02 mg/L y 0,63 mg/L, respectivamente).

Las concentraciones observadas se encuentran muy por debajo de los valores que cabría esperar en una balsa de mina o en un cauce afectado por AMD (Valente y Leal Gomes, 2009; Grande *et al.*, 2005a; Grande *et al.*, 2010a). Estas bajas concentraciones se deberían a los procesos de dilución que tienen lugar en el embalse El Sancho (Grande *et al.*, 2014a).

Análisis Factorial

Para el análisis factorial se seleccionaron dos factores que explican el 78 % de la varianza total de los datos (Factor 1: 59 % y Factor 2: 19 %). Las representaciones gráficas de estos factores se muestran en relación con las variables consideradas (Figura 5.12) y las muestras (Figura 5.13).

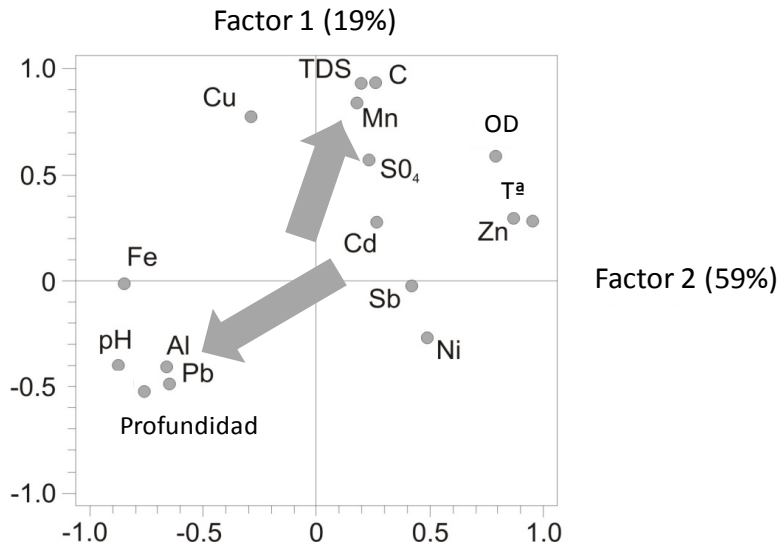


Figura 5.12. Análisis factorial de variables (Cerón *et al.*, 2013a).

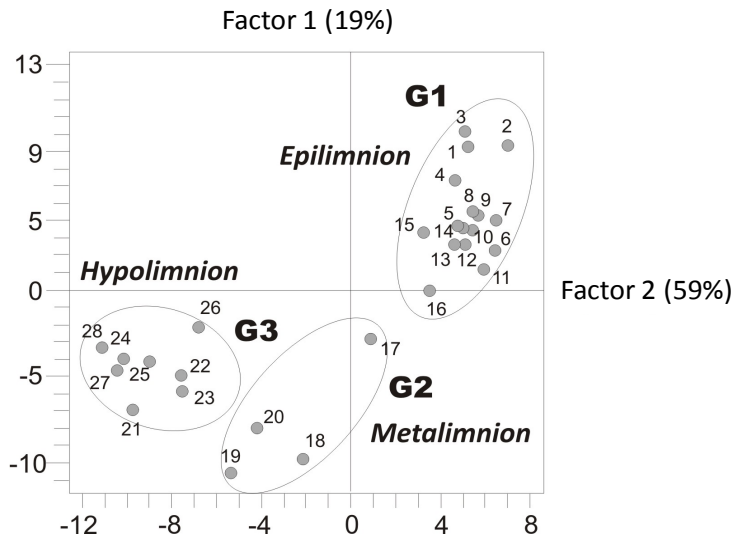


Figura 5.13. Análisis factorial de observaciones (Cerón *et al.*, 2013a).

En la Figura 5.12 se observa que las variables con mayor peso en la parte positiva del factor 1 son la temperatura y el Zn, mientras que en la parte negativa se encuentran el pH, Al, profundidad, Pb y Fe. El factor 2, condiciona principalmente la CE, TSD, sulfatos, Mn y Cu. El OD se encuentra en una posición casi intermedia respecto de los factores 1 y 2, encontrándose más afectado por el primero. Finalmente, las variables

Ni, Cd y Sb se sitúan en una posición alejada de los extremos, por lo que sufren una influencia moderada de ambos factores.

Con respecto al análisis factorial de observaciones (Figura 5.13), se puede diferenciar un primer grupo (G1) formado por las muestras 1 a 16 (más superficiales), un segundo grupo (G2) definido por las muestras 17 a 20, y un tercer grupo (G3) formado por las muestras 21 a 28. Estos tres conjuntos parecen responder a una agrupación en tres zonas relacionadas con los intervalos de profundidad: 0-16 m, 17-20 m y 21-28 m, respectivamente, que se aproximan a la propuesta por López-Pamo *et al.*, (2009).

Desde el puesto de vista hidroquímico, los factores 1 (59 %) y 2 (19 %) se relacionan con los procesos de reducción de sulfatos (Factor 1) y con la conductividad (Factor 2). El embalse El Sancho recibe grandes aportes de AMD, que están condicionados por la oxidación de sulfuros de la FPI (Nordstrom y Alpers, 1999; Younger, 2002; López-Pamo *et al.*, 2009), y que se ponen de manifiesto en los bajos valores de pH (3,5) y con la elevada conductividad eléctrica (472 $\mu\text{S}/\text{cm}$), esta última debida principalmente a la concentración de sulfatos. Son estos aportes los que condicionan la hidroquímica de las aguas del embalse.

El proceso de reducción de sulfatos (Factor 1) tendría lugar en las zonas más profundas del embalse y más empobrecidas en oxígeno (el hipolimnion), siendo las principales variables implicadas el oxígeno disuelto y la temperatura (parte positiva), y la profundidad, pH, Al, Pb y Fe (parte negativa). La cercanía del pH con el Al sugiere su relación con la precipitación de este ion. El proceso ya ha sido descrito anteriormente en la FPI por Sánchez-España *et al.*, (2008), López-Pamo *et al.*, (2009) y Santofimia-Pastor *et al.*, (2011), los cuales señalan que este ion provocaría un efecto tampón, precipitando y aumentando la concentración de H^+ en el sistema.

Con respecto a la conductividad (Factor 2), la disolución de sulfatos (provenientes de la oxidación de piritita) sería la principal variable responsable que origina un importante aumento de su concentración y el incremento de la conductividad eléctrica y el total de sólidos disueltos; este proceso se produciría en las zonas menos profundas del embalse y más enriquecidas en oxígeno (epilimnion).

La agrupación de las observaciones (Figura 5.13), también responde a estos dos procesos. Así un primer grupo (G1) agrupa a las muestras menos profundas (hasta el metro 16), más oxigenadas, con mayor conductividad, con altas concentraciones de sulfatos y pH más bajos (epilimnion). Un segundo grupo (G2), correspondiente a las muestras situadas en la zona intermedia (entre el metro 17 y 20) (metalimnion) y un

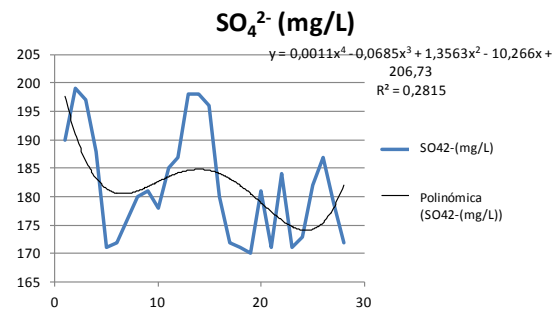
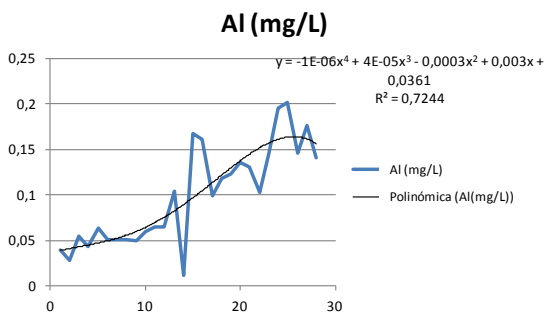
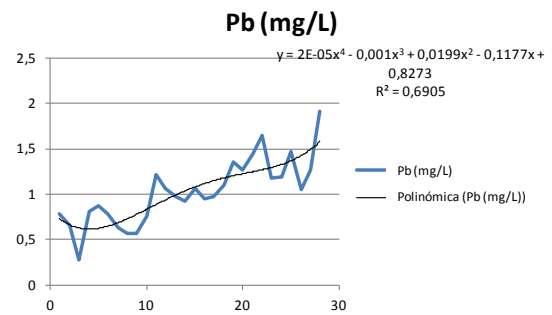
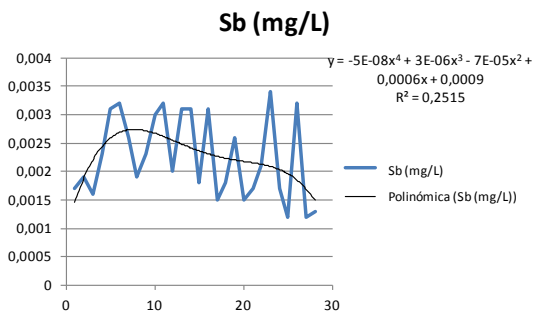
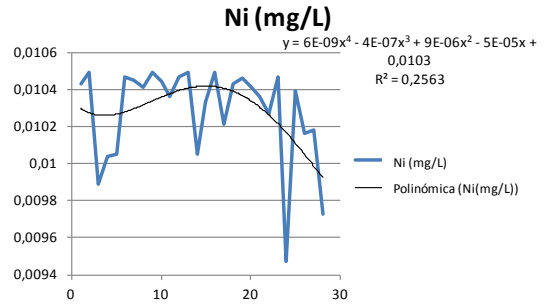
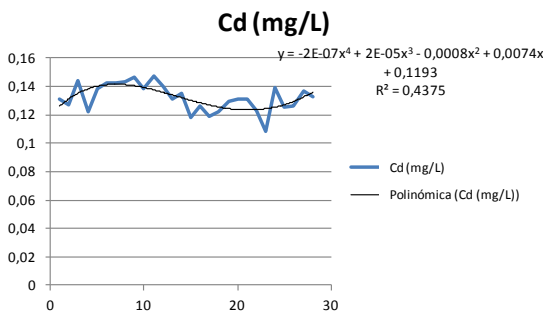
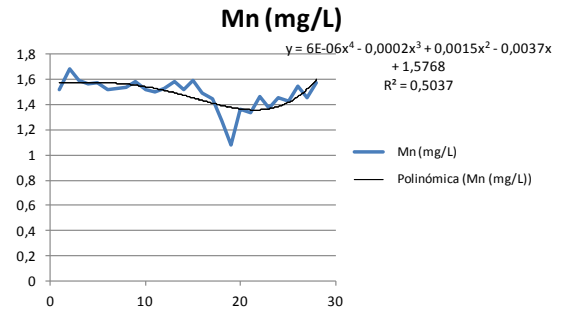
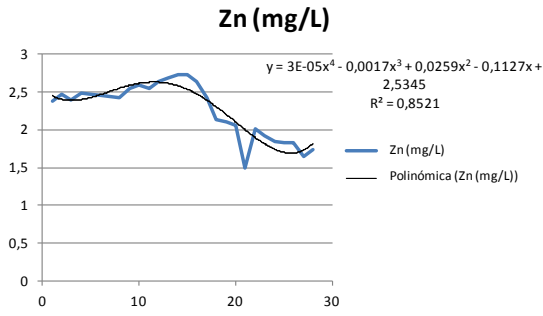
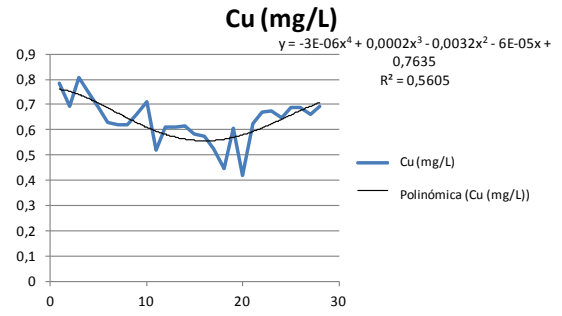
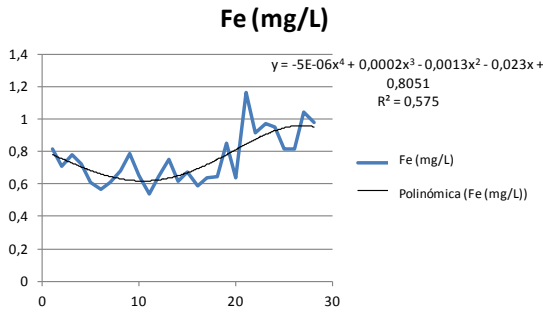
último grupo (G3) que reúne a las muestras más profundas, con menos oxigenación, menor conductividad, bajas concentraciones de sulfatos y pH más altos (Hipolimnion).

Así, el análisis factorial pone de manifiesto la estratificación del embalse y las afinidades de comportamiento hidrogeoquímico, relacionadas con los procesos de reducción de sulfatos (Factor 1) y la conductividad (Factor 2).

Gráficos de evolución en profundidad

En cuanto a la evolución en profundidad, se han extraído las siguientes observaciones de los gráficos presentados en la Figura 5.14, a partir de la tendencia general inferida por el patrón marcado por la función de redondeado polinómico de orden 4:

- La temperatura (T^a) se mantiene bastante estable, en torno a 26 °C, hasta los 16 metros de profundidad, mostrando una tendencia de descenso hasta los 20 metros. Desde este punto en adelante el descenso se hace menos pronunciado.
- El pH muestra un patrón similar, con valores estables alrededor de 3,5 hasta los 16 metros, a partir de donde se produce un fuerte aumento hasta los 20 metros de profundidad, alcanzando valores cercanos a 4,6. A partir de este punto este parámetro tiende a estabilizarse.
- Algo muy similar ocurre con el oxígeno disuelto (OD), presentando valores entre 5 y 6 mg/L, con un descenso lento en los primeros 15 metros. En este punto se produce una fuerte disminución hasta alcanzar los 19 metros, mostrando valores cercanos a cero en estas profundidades.
- Las tres variables descritas anteriormente definen una zona de transición entre los 15 y los 20 metros.
- La conductividad y los TSD tienen un comportamiento casi idéntico con descensos suaves hasta los 15 metros y una disminución brusca a partir del metro 20, donde se produce un aumento con la profundidad.
- Los sulfatos se comportan de manera similar a los anteriores con una concentración mínima alrededor de los 5 metros de profundidad.



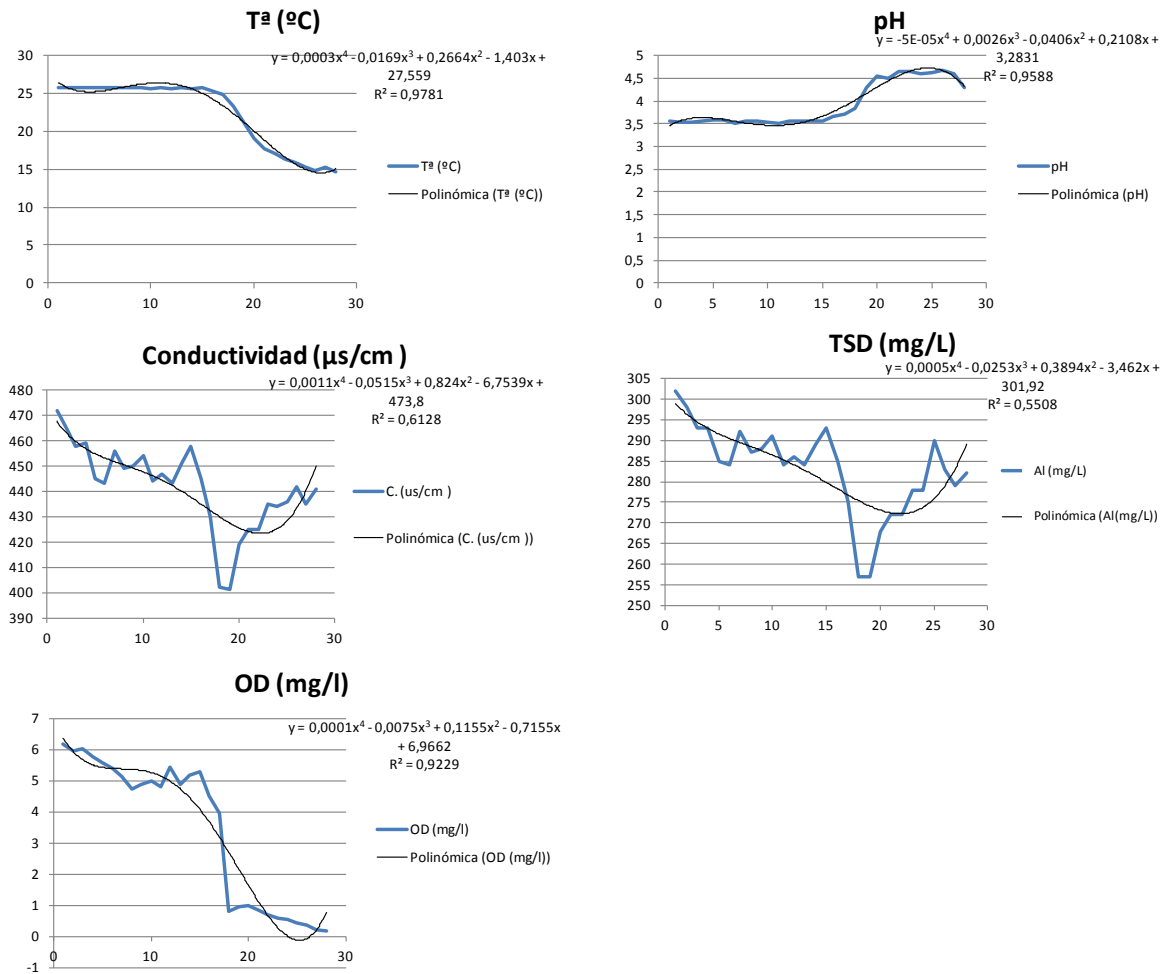


Figura 5.14. Gráficos de evolución en profundidad del agua muestreada en la presa del embalse El Sancho, con expresión numérica de la función de ajuste (Grande *et al.*, 2014a).

La función de fitness (polinomio de cuarto orden) permite ver con claridad el desarrollo de cada variable con la profundidad, como se puede deducir de los siguientes análisis gráficos:

- Las variables Cu, Fe, conductividad, TSD, Mn y Cd muestran una disminución de los valores hasta los 15 metros de profundidad, mostrando, desde este punto, tendencias crecientes.
- Las variables OD, Ni, Sb, temperatura y Zn muestran una suave disminución de los valores hasta los 15 metros. En este punto, se produce en todos ellos una repentina caída hasta los 20 metros de profundidad. A partir de este punto los valores se mantienen constantes o en un lento declive.

- El pH se mantiene estable hasta los 15 metros desde donde se produce un aumento repentino hasta los 20 metros. A partir de dicha profundidad tiende a estabilizarse alcanzando valores cercanos 4,6.
- El Pb y Al muestran un aumento de concentración con la profundidad a lo largo de toda la columna de agua.
- Los sulfatos muestran un comportamiento diferente, de alguna manera similar a los TSD y la conductividad, pero con un aumento único a los 15 metros.

En los gráficos de evolución de profundidad (Figura 5.14) se observa una clara estratificación de los valores de temperatura, pH, conductividad y OD, así como de las cargas de metales y sulfatos correspondientes asociadas a la profundidad. Este escenario es similar al descrito por Doyle y Runnells (1997) en López-Pamo *et al.*, (2009), que muestra una capa inferior más densa (hipolimnion) encontrada entre los 20 y 28 metros de profundidad, que no se mezcla con el resto. También hay una capa superficial (epilimnion), situado entre 0 y 16 metros, así como una capa de mezcla situada entre las anteriores (metalimnion), que aparece entre 16 y 20 metros de profundidad.

En cuanto a los parámetros de pH, temperatura y OD, conviene subrayar que los comportamientos coinciden con los descritos por Torres *et al.*, (2010) para el periodo de finales de verano, cuando la estratificación hidroquímica sucede. De hecho, los valores encontrados en el presente estudio para la capa profunda se encuentran cerca de los mencionados por estos autores.

Los resultados obtenidos para la conductividad son claramente diferentes de los de Torres *et al.*, (2010) y muy similares a los descritos por Sarmiento *et al.*, (2009), aunque para estos autores no hay una tendencia significativa. En el presente estudio se observa una tendencia muy clara, con valores mínimos en el hipolimnion a 20 metros y un aumento hasta los 28 metros. Este fenómeno es importante para justificar el aumento de carga de metal en el hipolimnion.

En cuanto a las cargas de metales disueltos, algunas similitudes y diferencias con los estudios mencionados anteriormente pueden ser señaladas. Se encontraron valores similares de Fe, Cu, Zn, Ni y Sb. En relación con el Cu, los valores determinados que oscilan entre 0,4 y 0,8 mg/L, son idénticos a los propuestos por ENCE, la empresa operadora de la presa (información interna de muestreo mensual). Esta gama es

también similar a la encontrada por Sarmiento *et al.*, (2008), pero muy diferente de la propuesta por Torres *et al.*, (2010). En cuanto al Fe, presenta concentraciones que oscilan entre 0,5 y 1,2 mg/L, valores casi idénticos a los encontrados por Sarmiento *et al.*, (2008) y claramente diferentes de los de Torres *et al.*, (2010), alcanzando un máximo de 4,2 mg/L. Para el Zn, los valores obtenidos en el presente estudio son idénticos a los citados. El Ni y Sb tienen valores similares, en la gama de mg/L, aunque de alguna manera inferiores a los propuestos por Sarmiento *et al.*, (2009). Las diferencias más significativas se encuentran en el Al, que en el presente estudio toma valores 26 veces más bajos que en el de Torres *et al.*, (2010). Algo similar ocurre con la concentración de Mn, que en este estudio es mucho menor que la descrita en los estudios de referencia. Otra diferencia sustancial es la que se encuentra para el Pb y Cd, siendo en este caso los valores más altos, alrededor de 300 veces en comparación por los propuestos por Torres *et al.*, (2010).

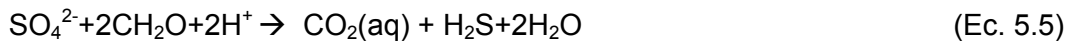
El aumento de las concentraciones en el hipolimnion es más evidente para el Cu, Pb, Fe, Al y Mn. En los casos de Cd, Ni y Sb, llegando a niveles de ppb, las variaciones son más pequeñas. El único metal que no sigue la tendencia es Zn.

Este aumento en la concentración de los metales en el hipolimnion es seguido por la disminución de concentración de sulfatos, comparado con lo que sucede en el epilimnion. A diferencia de otros registros, los datos obtenidos ponen en evidencia el aumento de la carga de metal es en la parte inferior del depósito, aunque estudios previos sólo detectan este hecho para el Fe.

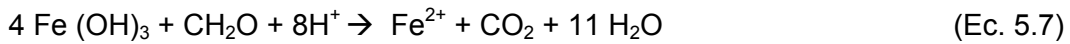
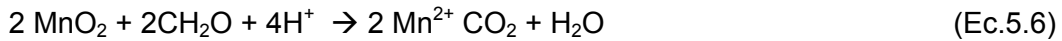
El aumento de pH que se produce en el hipolimnion se encuentra bien descrito por Torres *et al.*, (2010), lo que indica que el fenómeno está basado en las condiciones altamente reductoras que caracterizan esta zona. Estas condiciones provocan la reducción y la redisolución del Fe(III), que puede estar presente en forma de oxihidróxidos de hierro, lo que explicaría el aumento de Fe y pH a través de la reacción (Ec. 5.4):



Este proceso de disolución debe ser seguido por la movilización de otros metales que están adsorbidos en los precipitados de hierro. La disminución de sulfato cerca de la parte inferior se puede explicar por procesos de reducción microbiana, según la siguiente reacción, que también consume iones hidrógeno, promoviendo aumento del pH (Ec 5.5):



Además de la reducción de sulfato, varios autores describieron la reducción de compuestos metálicos por la materia orgánica (Wetzel, 2001; Schlesinger, 2005; Bohrer y Schultze, 2008). Este proceso también se puede explicar mediante el aumento de la carga en el hipolimnion, cerca de la parte inferior, a través de las reacciones (Ec 5.6 y Ec. 5.7):



Esta posibilidad está apoyada por el comportamiento de la conductividad y el total de sólidos disueltos, que presentan tendencias similares a las observadas para los metales.

Análisis cluster

A continuación se presentan los dendrogramas obtenidos a partir del análisis cluster, mediante el método Ward Euclideana (Figuras 5.15, 5.16), de la masa de datos obtenidas en el muestreo de agua estratificado en el embalse El Sancho.

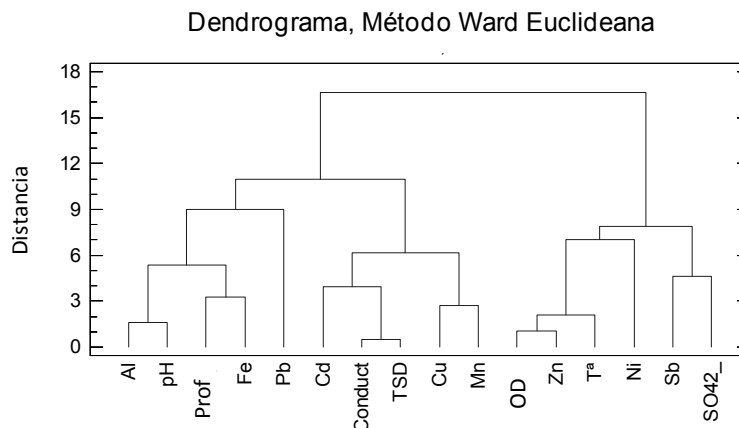


Figura 5.15. Cluster de variables (Grande *et al.*, 2014a).

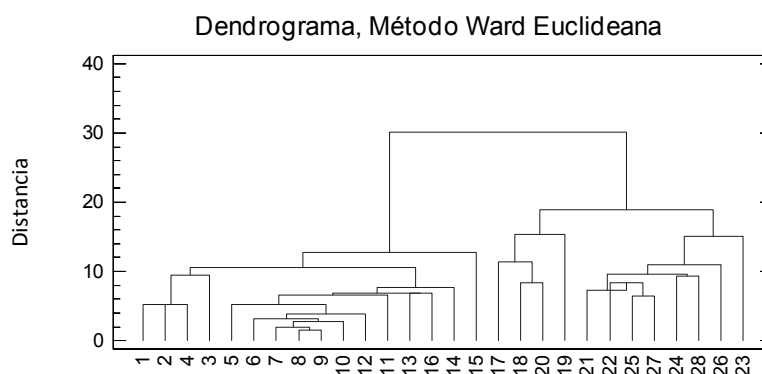


Figura 5.16. Cluster de observaciones (Grande *et al.*, 2014a).

El cluster de variables (Figura 5.15) muestra dos grupos: uno constituido por la T^a, OD, Zn, Ni, y el grupo Sb-SO₄²⁻, y otro con el resto de parámetros.

En este gráfico llama la atención que el pH está estrechamente relacionado con el Al y de una manera más discreta con la profundidad y el Fe, situándose muy lejos del resto de las variables. Por otro lado, la conductividad y los TSD están muy cerca entre sí y no lejos del Cd, Cu y Mn. El OD se encuentra muy cerca del Zn y de la T^a.

El cluster de observaciones (Figura 5.16) muestra claramente tres grupos correspondientes a las diferentes profundidades: (0-16 m), (16-20 m) y (20-28 m), lo que confirma la hipótesis planteada al inicio de este apartado.

En síntesis, el cluster de variables muestra claramente la proximidad entre el pH y el Al y, por lo tanto, sugiere que la química del agua está fuertemente influenciada por procesos de precipitación del Al. Esto indica el efecto tampón que ejerce el Al, que precipita en forma de fases cristalinas o amorfas. Este embalse parece regulado por la precipitación del Al, como ya ha sido descrito por López-Pamo *et al.*, (2009).

5.3.1.3.1. Conclusiones derivadas del estudio de las muestras de agua tomadas en el muestreo en profundidad, llevado a cabo de manera puntual, en la presa del embalse El Sancho

Tanto el análisis factorial, como el estudio gráfico en profundidad, así como el análisis cluster, ponen de manifiesto la estratificación de las agua del embalse El Sancho

según tres intervalos de profundidad diferentes: hipolimnion (20-28m), metalimnion (16-20m) y epilimnion (0-16m).

Se observa una agrupación de las muestras de agua en torno a estos niveles de profundidad. En el epilimnion encontramos aquellas más oxigenadas, con mayor conductividad, con altas concentraciones de sulfatos y pH más bajos. En el hipolimnion se hallan las muestras con menos oxigenación, menor conductividad, bajas concentraciones de sulfatos y pH más altos, mientras que en el metalimnion se sitúan las muestras de características intermedias.

Se ha observado como en el hipolimnion tienen lugar procesos de reducción de sulfatos, siendo las principales variables implicadas en el proceso el oxígeno disuelto, temperatura, profundidad, pH, Al, Pb y Fe, mientras que en el epilimnion, tienen lugar procesos de disolución, siendo el ion sulfato la principal variable responsable, lo que origina un aumento de la conductividad eléctrica y del total de sólidos disueltos.

El aumento de pH y Fe observado en el hipolimnion se debe a las condiciones altamente reductoras que caracterizan esta zona. Estas condiciones causan la reducción y la redisolución del Fe(III), que puede estar presente en forma de schwertmannita, lo que explicaría el aumento del Fe y del pH. Este proceso de redisolución debe ser seguido por la movilización de otros metales que son adsorbidos por los precipitados de hierro. La disminución de sulfato en el epilimnion puede ser explicada por la reducción microbiana y por la reducción de compuestos metálicos por la materia orgánica (Wetzel, 2001; Schlesinger, 2005; Bohrer y Schultze, 2008).

5.3.1.4. Muestreo de sedimentos llevado a cabo, de manera puntual, durante el periodo seco en el embalse Marismillas (Masa 3)

El proceso de colmatación de embalses afectados por AMD es uno de los objetivos de esta Tesis Doctoral. El fenómeno acontece como respuesta a dos procesos diferentes: uno como resultado de los depósitos de materia particulada al llegar al embalse, que se deposita como consecuencia de la disminución de la capacidad de transporte dinámico del flujo, y otro de carácter puramente químico, resultado de las variaciones en las condiciones ambientales reguladoras de la estabilidad de las fases disueltas y condicionadas por el gran volumen de la cuenca receptora en relación con el foco portador. El embalse Marismillas constituye, para el abordaje de este tema, un sitio de especial interés ya que en la actualidad se encuentra totalmente colmatado, como

resultado de los procesos anteriormente descritos, y ante la posibilidad, razonable, del hallazgo de acumulación de estos elementos de interés económico en profundidad.

Para el estudio del contenido en elementos mayores y traza en las muestras de sedimentos tomadas en el embalse Marismillas, de acuerdo con el protocolo descrito en el Capítulo 4, se han llevado a cabo los siguientes tratamientos: sumario estadístico, análisis gráfico, análisis cluster y estudio del factor de enriquecimiento.

Del presente estudio se deriva el trabajo de Valente *et al.*, (2014).

Sumario estadístico

En el sumario estadístico (Tabla 5.51) se puede observar como el Fe y Al presentan las mayores concentraciones medias, con valores de 349986 mg/kg y 100775 mg/kg respectivamente, presentando el S una media de 36325 mg/kg. Otros elementos tóxicos, tales como el As y Pb, se encuentran también con altas concentraciones (2515 mg/kg y 5172 mg/kg, respectivamente).

Algunos elementos de interés económico se encuentran presentes del mismo modo con altos contenidos, incluyendo el Ti (3564 mg/kg), Cu (1,34 mg/kg) y Zn (1,02 mg/kg). Concentraciones más bajas se observan para el P (809 mg/kg), Sb (503 mg/kg), Zr (206 mg/kg), Bi (192 mg/kg), Mn (154 mg/kg), Sn (112 mg/kg) y Rb (100 mg/kg). El resto de metales analizados presentan concentraciones inferiores a 100 mg/kg.

Los altos valores obtenidos en los sedimentos están directamente relacionados con los efectos del drenaje ácido de mina en este sistema afectado. Dichas concentraciones pueden ser el resultado por un lado, de los elementos disueltos de las aguas ácidas contaminadas producidas aguas arriba, y por otro, del material particulado arrastrado por el río Tinto hasta su llegada a la presa. En el presente caso, una tercera causa debe ser considerada, ya que el embalse Marismillas recibe descargas de la planta de tratamiento de aguas residuales procedentes de la población de Nerva (este hecho es desvelado por los resultados obtenidos para el P, con un máximo de 3530 mg/kg).

Entre los elementos traza, la mayor concentración media fue obtenida para el Pb, cuyo comportamiento geoquímico en procesos de drenaje ácido de mina es todavía poco conocido, debido a su baja movilidad (Shua *et al.*, 2001). Los resultados obtenidos (5172 mg/kg) confirman tal inmovilidad a través de la retención de los sedimentos, probablemente por adsorción en oxihidróxidos de hierro, tales como la jarosita.

| | Al (mg/Kg) | As (mg/Kg) | Ba (mg/Kg) | Ca (mg/Kg) | Cu (mg/Kg) | Fe (mg/Kg) | K (mg/Kg) | Mg (mg/Kg) | Mn (mg/Kg) | Na (mg/Kg) | P (mg/Kg) |
|---------------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Mínimo | 52144,0000 | 976,1500 | 41,5600 | 138,5900 | 63,1500 | 52995,0000 | 212,5200 | 1207,0800 | 52,2400 | 454,4200 | 229,7900 |
| Máximo | 324921,0000 | 12109,0000 | 4491,7500 | 84605,0000 | 7447,3000 | 349986,0000 | 33495,0000 | 8170,9200 | 722,5700 | 4933,2100 | 3533,4700 |
| Media | 100775,0000 | 2514,4800 | 2588,6100 | 1158,5600 | 1348,6800 | 103688,0000 | 19302,0000 | 2977,9300 | 154,0200 | 2266,9500 | 808,4700 |
| Desviación Estándar | 58917,0000 | 1772,1300 | 925,4700 | 8223,0900 | 1067,4400 | 63049,0000 | 5963,9000 | 920,4600 | 91,4000 | 606,8400 | 419,6100 |
| | Pb (mg/Kg) | S (mg/Kg) | Ti (mg/Kg) | Zn (mg/Kg) | Li (mg/Kg) | Be (mg/Kg) | Sc (mg/Kg) | V (mg/Kg) | Cr (mg/Kg) | Co (mg/Kg) | Ni (mg/Kg) |
| Mínimo | 61,3100 | 15587,0000 | 51,3800 | 190,1500 | 4,7800 | 0,1900 | 2,9600 | 13,1100 | 15,6000 | 5,7200 | 2,3600 |
| Máximo | 11922,0000 | 101507,0000 | 5716,5700 | 8749,8600 | 80,7400 | 2,8400 | 25,3800 | 193,0200 | 192,5600 | 207,6700 | 219,9800 |
| Media | 5172,4300 | 36325,0000 | 3564,0900 | 1028,8600 | 35,8900 | 1,5100 | 11,9800 | 85,1600 | 67,4900 | 23,0100 | 33,1600 |
| Desviación Estándar | 1950,2700 | 15908,0000 | 1095,1700 | 1240,9300 | 15,9300 | 0,5100 | 3,6300 | 35,1200 | 31,8400 | 25,6800 | 34,6000 |
| | Ga (mg/Kg) | Se (mg/Kg) | Rb (mg/Kg) | Sr (mg/Kg) | Y (mg/Kg) | Zr (mg/Kg) | Nb (mg/Kg) | Cd (mg/Kg) | Sn (mg/Kg) | Sb (mg/Kg) | Cs (mg/Kg) |
| Mínimo | 9,5000 | 0,9300 | 2,1600 | 1,4300 | 2,2100 | 4,7100 | -2,2400 | 0,2800 | 32,8000 | 29,2500 | 0,1300 |
| Máximo | 46,1600 | 49,0900 | 206,7500 | 200,2600 | 34,6200 | 342,8000 | 24,1700 | 43,4000 | 413,2600 | 1101,7800 | 10,1100 |
| Media | 25,6000 | 16,5200 | 100,3900 | 81,8700 | 21,8700 | 205,9600 | 13,0800 | 4,8100 | 111,6900 | 503,1500 | 5,6700 |
| Desviación Estándar | 7,6300 | 6,9600 | 36,2000 | 30,1800 | 6,3500 | 63,1400 | 4,9600 | 6,7800 | 65,3100 | 190,7000 | 2,0200 |
| | La (mg/Kg) | Ce (mg/Kg) | Pr (mg/Kg) | Nd (mg/Kg) | Sm (mg/Kg) | Eu (mg/Kg) | Gd (mg/Kg) | Tb (mg/Kg) | Dy (mg/Kg) | Ho (mg/Kg) | Er (mg/Kg) |
| Mínimo | 1,1600 | 4,3000 | 0,5900 | 2,7600 | 0,6200 | 0,1100 | 0,6100 | 0,0700 | 0,3700 | 0,0700 | 0,1700 |
| Máximo | 71,3600 | 133,9900 | 14,0200 | 51,4400 | 9,6400 | 1,9100 | 7,9700 | 1,0800 | 6,7400 | 1,4000 | 4,7000 |
| Media | 37,7100 | 81,2100 | 8,3400 | 32,8500 | 6,3200 | 1,1800 | 5,1200 | 0,7000 | 4,3600 | 0,8600 | 2,9000 |
| Desviación Estándar | 12,6800 | 22,5700 | 2,4100 | 8,9300 | 1,7300 | 0,3300 | 1,3900 | 0,1900 | 1,2200 | 0,2600 | 0,8500 |
| | Tm (mg/Kg) | Yb (mg/Kg) | Lu (mg/Kg) | Hf (mg/Kg) | W (mg/Kg) | Tl (mg/Kg) | Bi (mg/Kg) | Th (mg/Kg) | U (mg/Kg) | | |
| Mínimo | 0,0200 | 0,1500 | 0,0200 | 0,1200 | 0,3900 | 0,4800 | 4,4800 | 3,1700 | 0,4100 | | |
| Máximo | 0,7900 | 5,8000 | 0,9200 | 10,5100 | 16,6800 | 49,6500 | 494,1100 | 28,5100 | 10,0100 | | |
| Media | 0,4700 | 3,4500 | 0,5200 | 6,0900 | 5,4100 | 21,3600 | 191,3900 | 15,5700 | 5,5800 | | |
| Desviación Estándar | 0,1400 | 1,0300 | 0,1600 | 1,9200 | 2,0200 | 8,0800 | 80,5500 | 4,1900 | 1,6800 | | |

Tabla 5.51. Sumario estadístico de los parámetros analizados en las muestras de sedimentos del embalse Marismillas (Valente *et al.*, 2014).

Análisis gráfico

La Figura 5.17 muestra los perfiles verticales obtenidos para algunos elementos analizados en los tres sondeos realizados en el embalse de Marismillas.

En el sondeo 1 la evolución del Fe, Al, As y S es similar. Los valores máximos de Fe, Al, S y As han sido obtenidos a profundidades entre los 100 y 150 cm. En la base de este sondeo, los elementos presentan concentraciones similares. Para el Zn, Cu y Cd, los valores máximos fueron encontrados a los 75 cm de profundidad, con

concentraciones más bajas que los elementos anteriores. El elemento más variable a lo largo del perfil de profundidad ha sido el Pb, con un mínimo a los 120 cm.

En cuanto al sondeo, se ha observado una tendencia similar para el Fe, Al, As y S, con concentraciones máximas situadas entre 200 y 250 cm de profundidad. Para el Zn y Cd, encontramos dos máximos a 75 cm y 170 cm, respectivamente. A mayores profundidades, las concentraciones de estos dos elementos son similares a las medidas en superficie. El Cu muestra concentraciones similares a lo largo de todo el perfil de profundidad. La concentración más alta de este elemento se encuentra en la primera sección superior y en la parte inferior, alrededor de 300 cm. Respecto al Pb, las concentraciones encontradas fueron muy variables a lo largo de todo el perfil.

En relación con el sondeo 3, se encontraron resultados similares de nuevo para el Fe, Al, As y Cd, aunque las concentraciones máximas han sido obtenidas a mayores profundidades (aproximadamente 240 cm). Para el Zn y S, sus concentraciones máximas han sido obtenidas a los 200 cm y 175 cm, respectivamente. La distribución de todos los elementos en el resto del perfil es similar a la de los otros sondeos. Para el Pb, se han observado concentraciones más uniformes en comparación con los sondeos 1 y 2, con un mínimo a los 240 cm de profundidad.

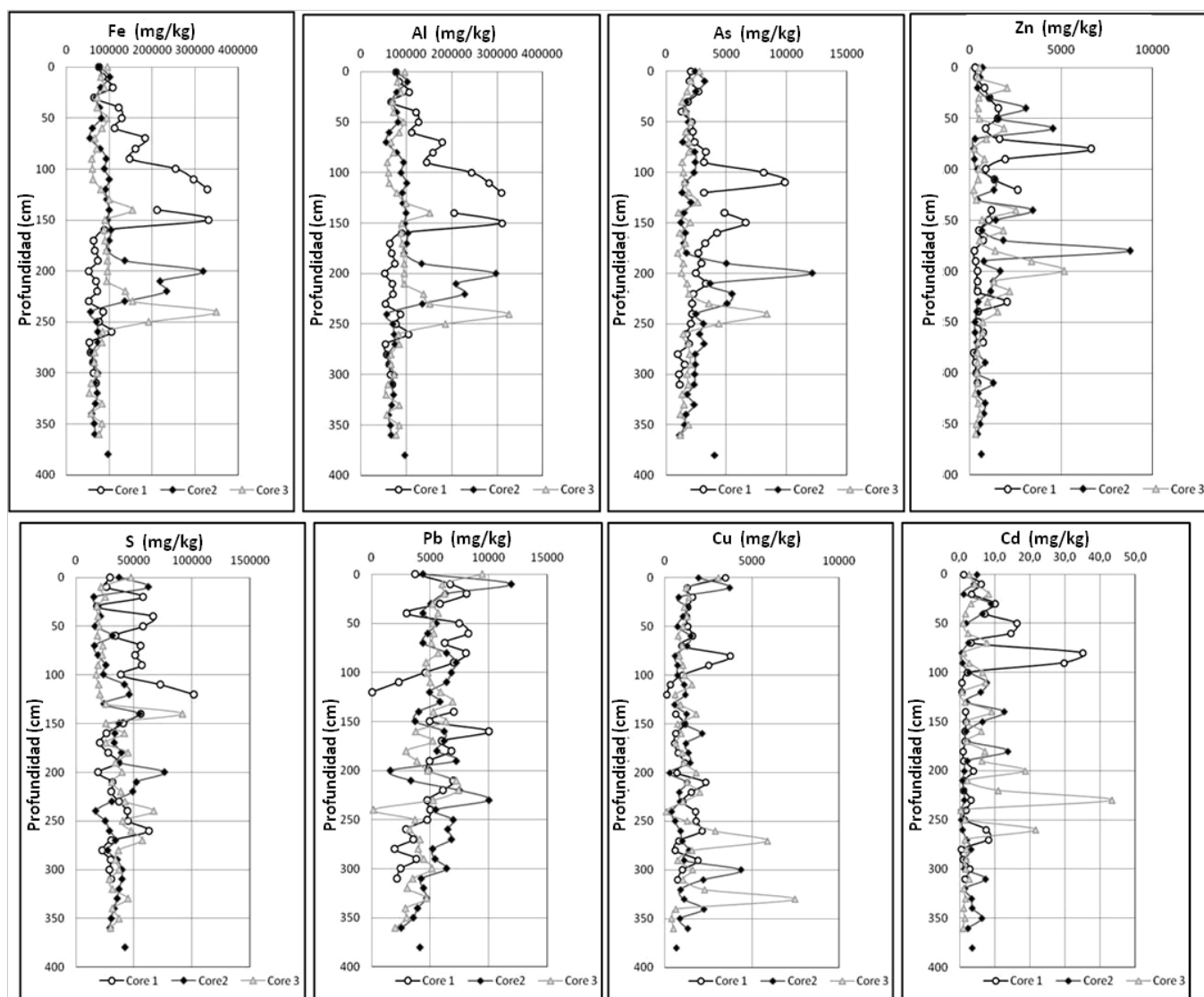


Figura 5.17. Perfiles verticales de concentración de Fe, Al, As, Zn, S, Pb, Cu y Cd en los sondeos (Valente *et al.*, 2014).

Factor de enriquecimiento

Para algunos de los elementos seleccionados (As, Ba, Cu, Pb, Zn, Be, V, Cr, Co, Ni, Sr y Y) se han calculado los factores de enriquecimiento (FE).

El factor de enriquecimiento se utiliza a menudo como un enfoque para analizar el impacto de las actividades humanas en ambientes sedimentarios (Chatterjee *et al.*, 2007; Hwang *et al.*, 2009). El factor de enriquecimiento permite comparar la concentración de un cierto elemento con la concentración esperada, si se eliminaran las contribuciones antropogénicas de este elemento del medio (nivel de fondo). Puede

existir un aporte antropogénico de metales cuando la concentración normalizada de las muestras es más alta que los niveles de fondo (Hwang *et al.*, 2009); es decir, cuando el factor de enriquecimiento es mayor que 1.

La Tabla 5.52 muestra los valores del factor de enriquecimiento (mínimo, máximo, media y varianza) obtenidos para los sedimentos de Marismillas.

Los factores de enriquecimiento se han calculado utilizando el Sc como un elemento de referencia (Ackermann, 1980; Salomons y Forstner, 1984; Loring, 1991; Shumilin *et al.*, 2002). El Sc es un indicador fiable de la contribución de los materiales de la corteza terrestre (Chester, 2000). Las concentraciones de fondo están representadas por dos muestras (llamadas 16Bacuta y 17Bacuta) obtenidas a partir de los sedimentos (gravas fluviales y arenas gruesas) de un sondeo de sedimento no contaminado, de 50 metros de profundidad, realizados en la isla Bacuta, ubicada en la zona central de la ría de Huelva, cerca de la confluencia de los ríos Tinto y Odiel (Ruiz *et al.*, 1998). Estas muestras han sido utilizadas para caracterizar las concentraciones medias de los sedimentos depositados, procedentes de los ríos Tinto y Odiel entre 10.000 y 8.700 años BP (datado con C-14) (Borrego *et al.*, 1999). Por lo tanto, son una aproximación a la concentración del metal pre-antropogénico en el sedimento, permitiendo conocer un enfoque de los niveles de enriquecimiento debido al aporte antropogénico, en este caso, de la actividad minera (Ridgway y Shimmield, 2002).

| 16 _{Bacuta} | Mínimo | Máximo | Media | Varianza | 17 _{Bacuta} | Mínimo | Máximo | Media | Varianza |
|----------------------|---------|----------|---------|-----------|----------------------|--------|----------|----------|-----------|
| Pb | 4,7000 | 208,7000 | 97,6000 | 1076,6120 | Pb | 6,9000 | 309,1000 | 144,6000 | 2362,9340 |
| As | 11,0000 | 278,4000 | 32,4000 | 1627,2960 | As | 6,6000 | 166,5000 | 19,4000 | 582,4930 |
| Ba | 0,9000 | 40,1000 | 14,3000 | 33,6830 | Ba | 0,8000 | 34,7000 | 12,4000 | 25,1560 |
| Cu | 1,0000 | 29,9000 | 7,2000 | 24,0200 | Cu | 0,4000 | 11,8000 | 2,8000 | 3,7370 |
| Zn | 0,5000 | 32,1000 | 3,7000 | 24,7190 | Zn | 0,5000 | 32,2000 | 3,7000 | 24,7790 |
| Zr | 0,3000 | 6,0000 | 3,4000 | 0,8780 | Zr | 0,3000 | 6,6000 | 3,8000 | 1,0840 |
| Be | 0,2000 | 0,6000 | 0,5000 | 0,0060 | Be | 0,2000 | 0,7000 | 0,5000 | 0,0070 |
| V | 0,2000 | 0,7000 | 0,5000 | 0,0100 | V | 0,2000 | 0,8000 | 0,5000 | 0,0110 |
| Cr | 0,2000 | 3,7000 | 0,4000 | 0,2170 | Cr | 0,2000 | 4,5000 | 0,5000 | 0,3150 |
| Co | 0,1000 | 6,5000 | 0,5000 | 0,6750 | Co | 0,1000 | 6,0000 | 0,4000 | 0,5790 |
| Ni | 0,0000 | 3,9000 | 0,4000 | 0,3040 | Ni | 0,1000 | 4,4000 | 0,4000 | 0,3760 |
| Sr | 0,0000 | 1,0000 | 0,6000 | 0,0250 | Sr | 0,1000 | 1,5000 | 1,0000 | 0,0600 |
| Y | 0,2000 | 1,0000 | 0,6000 | 0,0230 | Y | 0,2000 | 1,2000 | 0,7000 | 0,0330 |

Tabla 5.52 Sumario estadístico de los factores de enriquecimiento de los elementos analizados en los sedimentos del embalse Marismillas (El Sc es el elemento de referencia, analizado en las muestras 16_{Bacuta} y 17_{Bacuta}, obtenidas en los sedimentos fluviales (Ruiz *et al.*, 1998).

Los factores de enriquecimiento (Figura 5.18) se calcularon mediante la siguiente fórmula:

$$FE = (M_{sed} / S_{csed}) / (M_{Bacuta} / S_{cBacuta}),$$

donde:

- FE es el factor de enriquecimiento;
- M_{sed} es la concentración del elemento en los sedimentos de Marismillas;
- S_{csed} es la concentración de Sc en los sedimentos de Marismillas;
- M_{Bacuta} es la concentración media del elemento en sedimentos de Bacuta;
- $S_{cBacuta}$ es la concentración media de Sc en sedimentos de Bacuta.

Sobre la base de los valores obtenidos del factor de enriquecimiento (Tabla 3 y Fig. 4), los elementos presentes en los sedimentos de los núcleos se pueden separar en tres grupos:

- Grupo A: Elementos empobrecidos ($FE < 1$): Se, V, Cr, Co, Ni, Sr y Y.
- Grupo B: Elementos enriquecidos ($1 < FE < 10$): Cu, Zn y Zr.
- Grupo C: Elementos altamente enriquecidos ($FE > 10$): As, Ba y Pb.

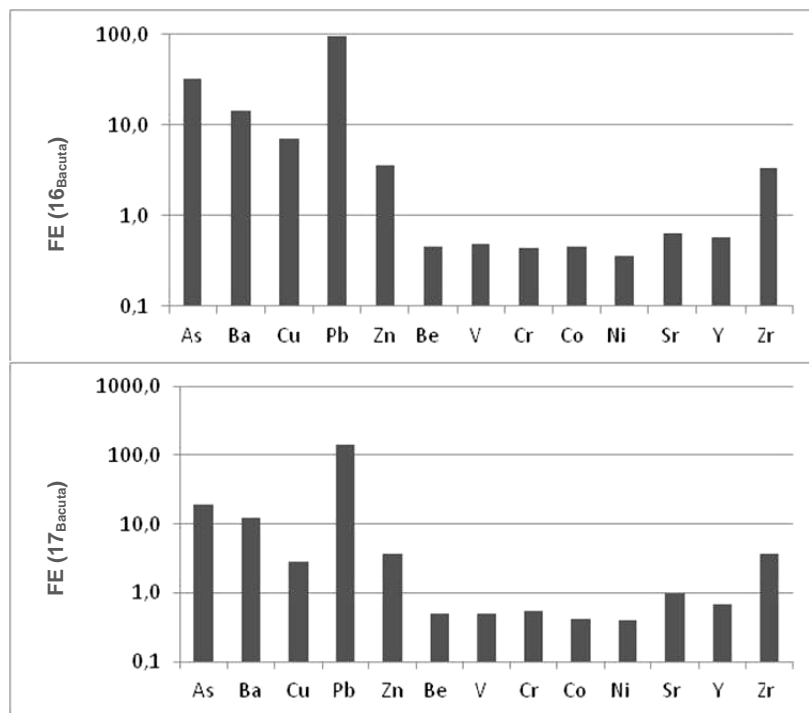


Figura 5.18. Media de los factores de enriquecimiento de los elementos estudiados en los sondeos de Marismillas (Valente *et al.*, 2014).

Los Grupos B y C corresponden a los elementos asociados a los depósitos de sulfuros polimetálicos situados en la cuenca del río Tinto (Leblanc *et al.*, 2000). A la entrada en la presa, la evolución geoquímica de las aguas contaminadas por proceso AMD, promueve la precipitación de metales y de arsénico, lo que justifica el enriquecimiento observado.

La Figura 5.19 muestra los perfiles verticales de los factores de enriquecimiento en estas mismas muestras para los elementos relacionados con los depósitos de sulfuros (Cu, Zn, Pb y As). Los valores del factor de enriquecimiento para el Pb alcanzan un máximo en los primeros centímetros, con valores del factor de enriquecimiento que aumentan en profundidad, mientras que los valores mínimos se han encontrado a 130 cm (sondeo 1) y 230 cm (sondeo 2), con un máximo correspondiente al sondeo 3 a 240 cm. Por debajo de esa profundidad, se han encontrado factores de enriquecimiento similares en los tres sondeos. Para el Cu, se obtiene una tendencia similar con valores máximos del factor de enriquecimiento a los 270 cm (sondeo 1), 300 cm (sondeo 2) y 330 cm (sondeo 3). Por el contrario, los perfiles de los factores de enriquecimiento para el Zn y As difieren de los del Pb y Cu. Por lo general, hay poca variación para el Zn por debajo de los 10 cm, con máximos alrededor de los 130 cm (sondeo 1), 180 cm (sondeo 2) y 200 cm (sondeo 3). El As presenta la menor variación a lo largo del perfil, con máximos a los 125 cm (sondeo 1), 200 cm (sondeo 2) y 245 cm (sondeo 3). Los incrementos observados para los factores de enriquecimiento podrían estar relacionados con periodos de tiempo con una gran actividad minera, que a su vez, representa mayores entradas de drenaje ácido en el embalse Marismillas.

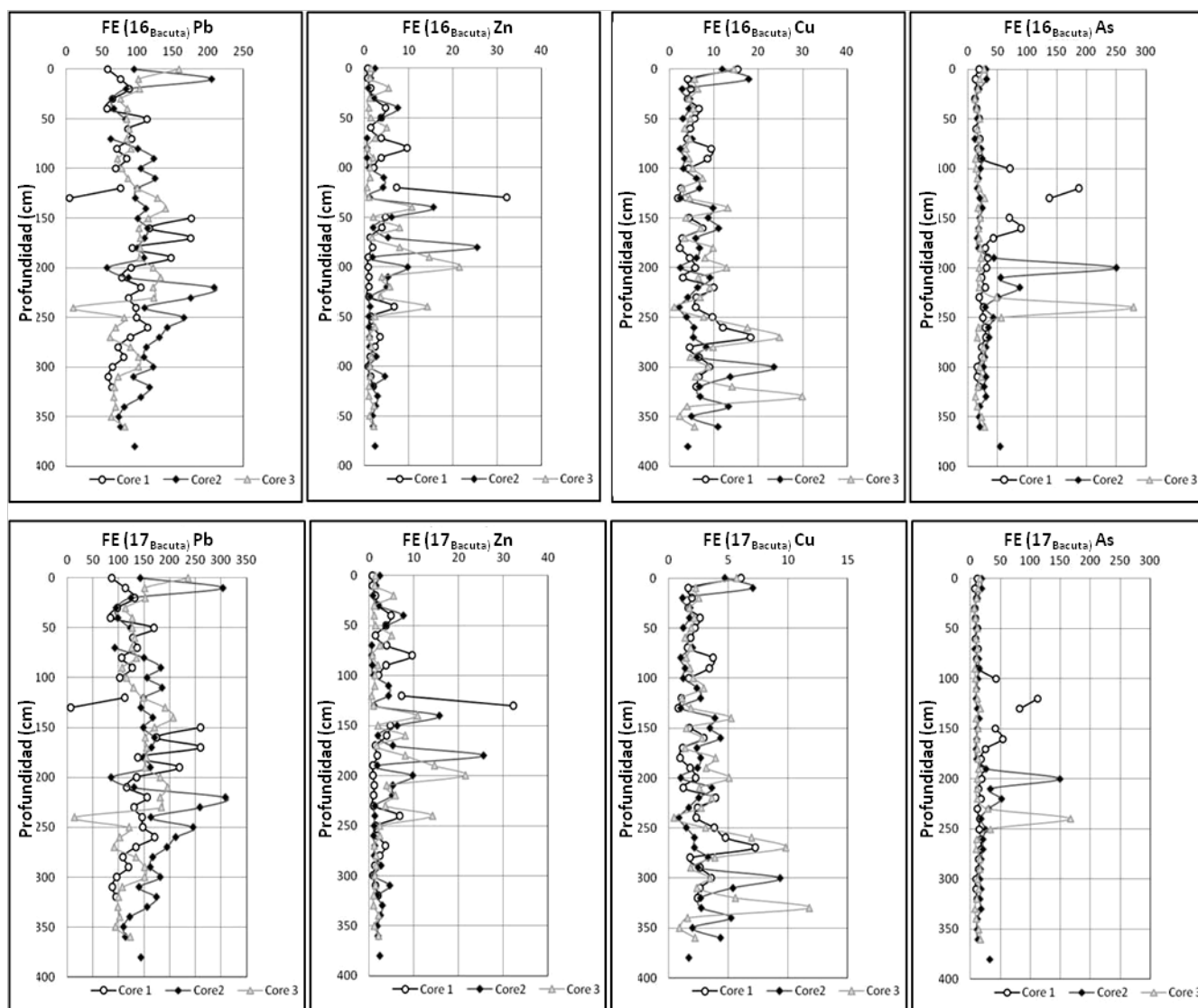


Figura 5.19. Perfiles verticales de los factores de enriquecimiento (FE) para los metales estudiados en los sondeos de Marismillas (Valente *et al.*, 2014).

Análisis cluster

La Figura 5.20 muestra el dendrograma correspondiente al análisis cluster obtenido para todos los elementos estudiados en los sondeos realizados en el embalse Marismillas.

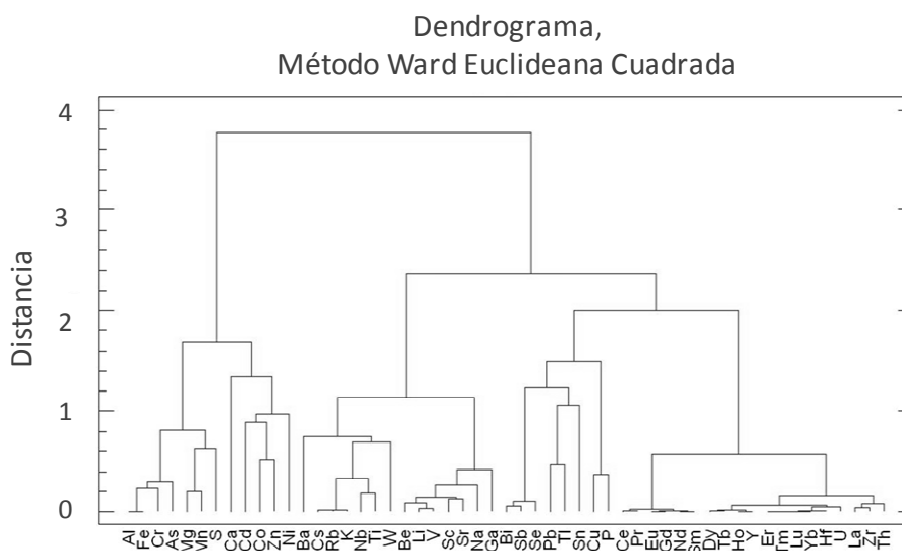


Figura 5.20. Análisis cluster obtenido para todos los elementos estudiados en los sondeos realizados en los sedimentos del embalse Marismillas (Valente *et al.*, 2014).

En el dendrograma obtenido del análisis cluster (Figura 5.20) se observan dos grupos principales de variables, formados cada uno de ellos, a su vez, por diferentes subclusters.

Uno de los principales cluster (Grupo 1) corresponde a la asociación formada por Al, Fe, Cr, As, Mg, Mn, S, Cd, Co, Zn y Ni, mientras que el otro gran cluster es aquel que comprende las variables restantes. Este último se encuentra integrado por tres subgrupos: un primer subcluster (Grupo 2) formado por el Ba, Cs, Rb, K, Nb, Ti, W, Be, Li, V, Sc, Sr, Na y Ga; un segundo subgrupo (Grupo 3) formado por el Bi, Sb, Se, Pb, Tl, Sn, Cu y un tercer subcluster (Grupo 4) formado por el Ce, Pr, Eu, Gd, Nd, Sm, Dy, Tb, Ho, Y, Er, Tm, Lu, Yb, Hf, U, La, Zr y Th.

En la Faja Pirita Ibérica existen diferentes tipos de materiales, que aparecen representados por elementos que componen estos grupos, tales como: aquellos que proceden de la precipitación química responsable de la formación de sulfuros masivos; aquellos que proceden de materiales detríticos con tamaño de grano muy fino con origen continental, en representación del grupo Culm; los que son resultado de la

precipitación química por sobresaturación de soluciones marinas profundas o de rocas volcánicas félsicas con diferentes grados y tipos de alteración hidrotermal.

El Grupo 1 representa el quimismo directamente relacionado con la minería. Así, incluye elementos procedentes de la disolución de la paragénesis mineral de los sulfuros (como el Fe y S) y de las rocas encajantes presentes en las escombreras (como el Al y Mg). Su presencia y comportamiento pueden, entonces, ser justificados en base a la paragénesis mineral que comprende principalmente piritita, calcopiritita, blenda y otros sulfuros polimetálicos, y en el de los minerales de la ganga, que presentan diferentes respuestas a la disolución en un medio ácido tan extremo. Estos últimos son los silicatos de las rocas del encajante a veces afectados por la alteración hidrotermal. El fuerte grado de cloritas y la alteración hidrotermal sericitica, reportado por (Sánchez-España *et al.*, 2000), contribuye a la presencia de Mg y Ca en este grupo. En el caso del Mn, aunque no pertenece a la paragénesis mineral, su presencia puede ser explicada por las relaciones cronoestratigráficas. En la serie estratigráfica hay un nivel de lutitas de color púrpura con jaspes y depósitos de Mn (Tornos, 2006). La Figura 5.20 muestra también como el Grupo 1 incluye elementos con diferentes coeficientes de proximidad, lo que puede explicarse por la heterogeneidad de los elementos movilizados. De hecho, en todo el complejo de Riotinto había explotaciones para beneficio de los diferentes elementos, principalmente, Cu, S, y metales preciosos, que representan distintas paragénesis minerales. Por el contrario, la ganga presenta una composición más constante, lo que puede explicar la alta proximidad obtenida para el par Fe-Al. Esta alta correlación también indica el efecto de la acidez sobre los sulfuros y aluminosilicatos, sufriendo ambos, procesos de disolución en condiciones ácidas.

El Grupo 2 comprende elementos tales como el Sr y Na, indicadores típicos de origen marino. Los que, junto con las otras variables del grupo, confirman la presencia de elementos no relacionados con la paragénesis mineral, es decir, filosilicatos y feldespatos, por ejemplo.

El Grupo 3 presenta un conjunto de elementos con bajos coeficientes de proximidad, que puede justificarse por una gran variedad de razones que han estado operando en este escenario durante más de 4000 años de minería, como pueden ser: inconsistencia de procedencia mineralógica y geoquímica (por ejemplo, el P puede tener contribuciones orgánicas); diferentes niveles de abundancia en las escombreras de las que proceden los lixiviados; fluctuaciones cíclicas que evidencian la explotación de minerales diferentes en distintos momentos (por ejemplo Cu o S); niveles distintivos

de recuperación de mineral en respuesta a la demanda histórica o diferentes grados de restablecimiento de la vegetación en las escombreras, entre otros.

Los elementos de tierras raras forman un grupo coherente con un comportamiento similar. Su movilidad limitada, su fraccionamiento durante la meteorización y la sensibilidad a las modificaciones de pH, hacen de ellos buenas trazas para la contaminación por AMD (Delgado *et al.*, 2012, Borrego *et al.*, 2012). Por lo tanto, su agrupación en el Grupo 4 junto con otros elementos de afinidad geoquímica es un resultado esperado. En este grupo se encuentran los coeficientes más altos de proximidad entre las variables de todo el dendrograma. Estos coeficientes de correlación de Pearson se corresponden con los resultados obtenidos por Carro *et al.*, (2011), para este tipo de variables en ambientes ácidos (Valente *et al.*, 2014).

5.3.1.4.1. Conclusiones derivadas del estudio de las muestras tomadas en el muestreo de sedimentos llevado a cabo, de manera puntual, en el periodo seco en el embalse Marismillas

Las altas concentraciones obtenidas para los elementos analizados en los sedimentos del embalse Marismillas evidencian su afección por procesos AMD, debido al aporte de elementos en disolución y material particulado transportado por el río Tinto. Además de éstos, existe una tercera fuente de entrada procedentes de las aguas residuales de la población de Nerva.

El origen de estos elementos puede ser muy variado: por un lado aquellos que están relacionados directamente con la paragénesis mineral de los sulfuros (Fe y S) y con la roca encajante (Al y Mg), y aquellos que no lo están, pudiendo tener procedencia marina (Sr y Na), procedencia orgánica (P), etc.

El factor de enriquecimiento nos ha permitido agrupar los elementos en: elementos empobrecidos, elementos enriquecidos y elementos altamente enriquecidos, correspondiéndose éstos dos últimos a los asociados a los depósitos de sulfuros polimetálicos.

La distribución vertical de los elementos a lo largo de los perfiles de los sondeos, así como las diferencias de proximidad estadísticas entre ellos, reflejan las fluctuaciones de la antigua actividad minera en la cuenca del Tinto (Valente *et al.*, 2014).

5.3.1.5. Muestreo de agua llevado a cabo, de manera puntual, en mina Poderosa (Masa 4)

Para el estudio del conjunto de variables físico-químicas medidas en el muestreo puntual realizado en mina Poderosa en el primer año hidrológico, descrito en el Capítulo 4, se ha llevado a cabo análisis cluster y análisis gráfico, desarrollados en los trabajos de Grande *et al.*, (2012, 2014b).

El interés de este estudio radica en la caracterización del proceso AMD en el medio generador con atención a la evolución hidroquímica provocada por fenómenos de hidrólisis.

Cabe recordar que se trata de un efluente que procede de una galería y es monitorizado a lo largo de todo su recorrido hasta su desembocadura en el río Odiel, fijándose para ello 17 puntos de muestreo, el primero en el interior de la galería y el último en el Odiel tras la confluencia.

Análisis cluster

El dendrograma de la Figura 5.21 muestra la agrupación de los puntos de muestreo en mina Poderosa, de acuerdo con su grado de proximidad definido por el coeficiente de Pearson, mientras que la Figura 5.22 muestra el análisis cluster de variables para los parámetros físico-químicos medidos en los diferentes puntos de muestreo.

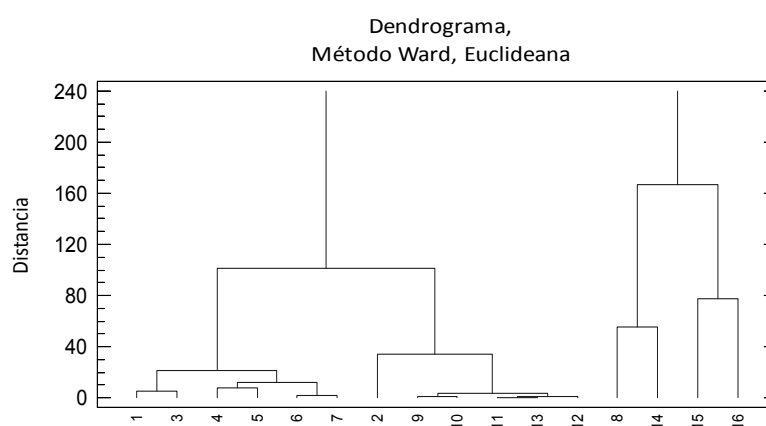


Figura 5.21. Dendrograma de observaciones para los puntos de muestreo en mina Poderosa (Grande *et al.*, 2014b).

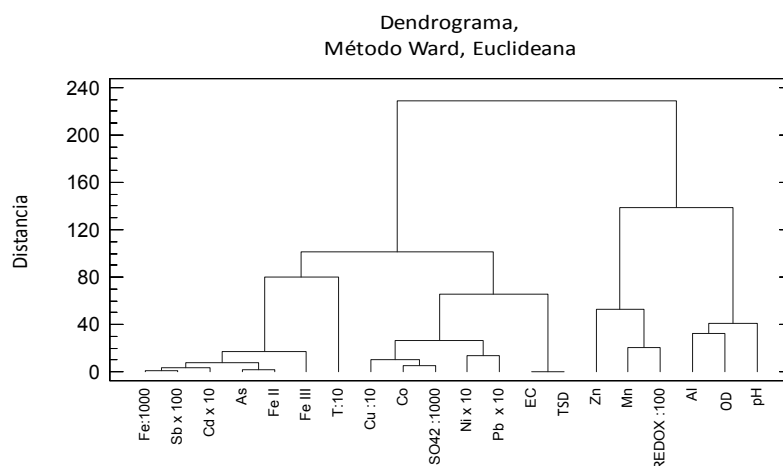


Figura 5.22. Dendrograma de variables para los parámetros físico-químicos muestreados en mina Poderosa (Grande *et al.*, 2014b).

El análisis cluster de los puntos de muestreo (Figura 5.21) revela la existencia de dos grupos claramente definidos: uno correspondiente a los puntos de muestro P8, P14, P15, y P16, y otro formado por el resto de puntos.

Al contrario que el primer grupo, el segundo presenta fuertes coeficientes de correlación. Puede observarse una fuerte afinidad entre los puntos que van desde P9 a P13, los cuales se encuentran apartados del resto de puntos: P1, P3, P4 P5, P6, y P7. Además, este análisis cluster revela que el punto de muestreo P2 (correspondiente a la salida de la galería), está estrechamente relacionado con los grupos compuestos por los puntos mencionados anteriormente, que van desde P9 a P13.

De manera idéntica, la Figura 5.22 muestra el mismo tipo de análisis, pero considerando los parámetros de campo y laboratorio como variables. Como en el caso anterior, se observan dos grupos principales: uno de ellos formado por el Zn, Mn y redox, junto con el Al, OD y pH (con moderada afinidad), y otro grupo, comprendido por otro dos subgrupos. El primer subgrupo integrado por el Fe, Sb, Cd, As, Fe(II), Fe(III), y la temperatura, mientras que el segundo incluye al Cu, Co, SO_4^{2-} , Ni, Pb, conductividad y TSD. Debe ser notada la fuerte correlación observada entre los sólidos disueltos y la conductividad eléctrica (la mayor entre las variables estudiadas). Por otro lado, la temperatura y el Mn presentan una correlación considerable, aunque menor que la del resto de variables.

En el dendrograma de los puntos de muestreo se observa, en general, como se organizan según su secuencia espacial. Los puntos P2 y P8 son excepciones,

encontrándose desplazados e integrados en un subcluster con los puntos encontrados río abajo.

En cuanto a P2, tal desplazamiento podría estar reflejando el gradiente geoquímico impuesto por la rápida transición a la exposición al aire fuera de la galería y con mayor oxigenación. Cabe señalar que aquí el agua que sale por el túnel, sufre un contraste rápido en las condiciones de temperatura, oxigenación y redox. Por lo tanto, la hidroquímica en P2 es más similar a los vecinos de su agrupación río abajo (P9-P13), que tuvieron tiempo para desarrollar sus propiedades físico-químicas. Idénticamente, P8 representa el efluente industrial, que habría sufrido evolución durante, aproximadamente, 1 km. Esto puede justificar su mayor similitud a los sitios más evolucionados y más lejanos, al proceder de un área de canales.

La Figura 5.21 revela fuertes relaciones de interdependencia entre los puntos que van de P9 a P12. La explicación a esta alta proximidad se encuentra en la falta de aportes capaces de modificar las propiedades del agua en esta sección del arroyo (aproximadamente 60 m). Por el contrario, la baja proximidad observada para el grupo más distal (P8, P14, P15 y P16) indica una diferencia con respecto a los puntos aguas arriba, lo que es consecuencia de los cambios prominentes impuestos por el segundo tributario, que tiene características hidroquímicas muy diferentes (P15), procedentes de la mina El Soldado.

El comportamiento de las agrupaciones formados por los parámetros físico-químicos observadas en la Figura 5.22, puede estar relacionado con varios fenómenos geoquímicos y mineralógicos, tales como oxidación, neutralización, precipitación y adsorción (Sánchez-España *et al.*, 2006b). Igualmente, las entradas de dos efluentes distintos también contribuyen a dicha agrupación, revelado por las variables menos relacionadas con el EH. Éstos están influenciados por la presencia de Al y valores más altos de pH (desde P15), así como por la entrada de contaminantes mineros, cerca de P12. Por lo tanto, el primer grupo, que se encuentra en el lado derecho del dendrograma, agrupa a las variables relacionadas con materiales alóctonos, es decir, no relacionadas con la paragénesis mineral, con el EH, O₂ y pH, aunque con relaciones de proximidad discretas.

Por otro lado, el resto de las variables componen dos sub-grupos con relaciones de proximidad fuertes. El grupo que comprende el Sb, Cd, As, Fe(II) y Fe(III), representa la afinidad paragenética y los procesos de oxidación de sulfuros. El subcluster central denota una relación muy íntima entre SO₄²⁻, Co y Cu. Esto es probablemente debido al

control impuesto por la precipitación y la co-precipitación de los metales como sales de sulfato.

Análisis gráfico

La Figura 5.23 muestra como, con excepción de la conductividad eléctrica (CE) y el total de sólidos disueltos (TSD), todos los parámetros muestran una tendencia de aumento global hasta su llegada al río Odiel. Los dos parámetros citados se comportan de manera similar, con una inflexión clara en el segundo punto (P2), donde definen un mínimo, mientras que el pH presenta un ligero aumento en este punto. El punto de muestreo P9, los parámetros Eh, O₂ y pH indican un aumento moderado, en comparación con el anterior. Simultáneamente, es posible observar una disminución de la conductividad, la temperatura y TSD. Cabe señalar que entre P7 y P9 hay una entrada de agua, en relación con la confluencia del efluente minero (P8). En el punto de muestreo P14, inmediatamente aguas arriba de la confluencia de un afluente menos contaminado, el Eh y el O₂ sufren un aumento, mientras que la temperatura, el pH y TSD disminuyen.

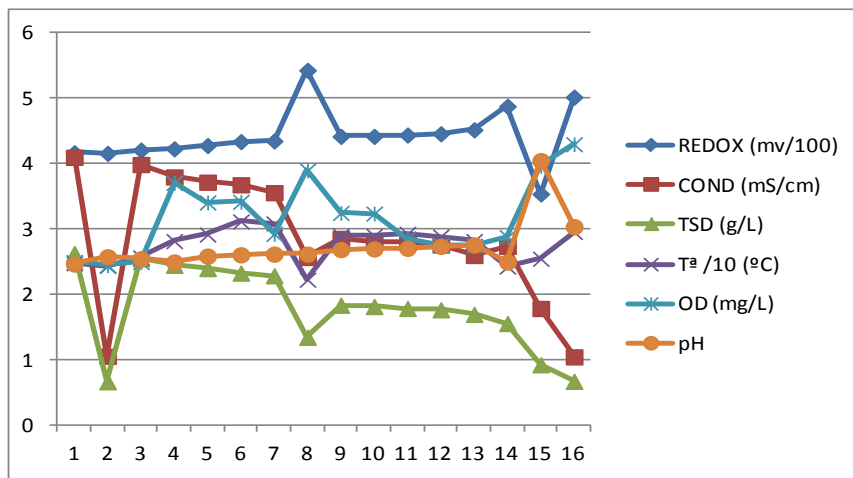


Figura 5.23. Gráfica de evolución espacial de los parámetros medidos *in situ* en los diferentes puntos de muestreo en mina Poderosa (Grande *et al.*, 2014b).

Los elementos As, Pb, Cd, Ni, Fe(II) y Co (Fig. 5.24) presentan una fuerte disminución en el punto 2. Por otro lado, Cu y SO₄²⁻ registran un aumento con respecto al punto anterior como respuesta al mayor grado de evolución del afluente procedente del área de canales. En el punto de muestreo P7, se observa una tendencia de aumento en el conjunto de parámetros: As, Pb, Zn, Co, Pb, Sb, y SO₄²⁻, por el contrario, Cd, Ni y Fe(II) disminuyen su concentración. En el punto de muestreo P8, casi antes de la

entrada del efluente industrial, Mn, Zn y Ni muestran un incremento, mientras que el resto de los parámetros disminuyen claramente. En P14, el grupo compuesto por Mn, Ni, Pb, y SO_4^{2-} aumenta de nuevo, mientras que el resto de los contaminantes indican una tendencia a la disminución. En respuesta a la descarga de aguas de menos contaminadas (punto de muestreo P15), el Al aparece, por primera vez, con concentraciones relevantes. Además, hay un aumento en las concentraciones de Zn, Cd, Sb y Fe(III).

La tendencia creciente aguas abajo (Figura 5.23) se puede explicar por los siguientes fenómenos:

- Mayor capacidad del oxidante conforme aumenta la distancia a la fuente anóxica, como es sugerido por el comportamiento del OD.
- La evolución de temperatura resultante de la exposición a la radiación solar, que es más alta con la distancia al túnel de salida.
- La tendencia del pH es algo más compleja, ya que es controlada por un conjunto de procesos diferentes, tales como la neutralización, dilución, precipitación, adsorción y disolución. Estos procesos conducen a aumentar los valores de pH, mientras que la oxidación del hierro contribuye a la liberación de H^+ , y, como consecuencia a la disminución del pH.

La conductividad eléctrica y los TSD presentan un comportamiento diferente, aunque similar entre ellos. La Figura 5.24 muestra que ambas evoluciones son idénticas, con una inflexión en P2, correspondiéndose al primer punto oxigenado, que se encuentra inmediatamente aguas debajo de un remanso de agua situado a la salida del túnel. La tendencia observada puede estar relacionada con la ausencia de cloruros, que podrían enmascarar dicha relación ampliamente descrita en medios estuarinos afectados por AMD (Borrego *et al.*, 2011). Ésto sugiere que en entornos afectados por AMD, los altos valores de conductividad no dependen de la carga metálica, pero que están relacionados con los TSD. Igualmente, la ausencia de similitud entre el pH y la conductividad ya fue observada y discutida por Grande *et al.*, (2010e).

La evolución espacial de los metales (Figura. 5.24) parece revelar el efecto de los procesos de atenuación natural, principalmente de dilución y precipitación. En P2, donde aumenta la oxigenación y la exposición al sol, se hace notar la fuerte disminución de las concentraciones de Fe(II). Esto podría ser respuesta a la oxidación del hierro, con un consiguiente incremento de la acidez y posterior precipitación de

especies de Fe(III). Además, los fenómenos como la adsorción en la materia en suspensión podrían promover la retención de otros elementos, tales como As, Sb, y Ni.

Algo diferente es el comportamiento que presentan los sulfatos. Este parámetro muestra una ligera tendencia creciente que podría estar relacionada con la presencia de sulfuros particulados a lo largo del arroyo. Este material particulado sufre oxidación, con la subsecuente disminución del pH y movilización de sulfatos y metales.

En este escenario, la contribución de la oxidación biótica, ampliamente descrita, por ejemplo, en Sánchez-España *et al.*, (2007), también deben ser consideradas. Esta acción biótica se vería reforzada por el aumento de la temperatura y la disponibilidad de oxígeno en el medio.

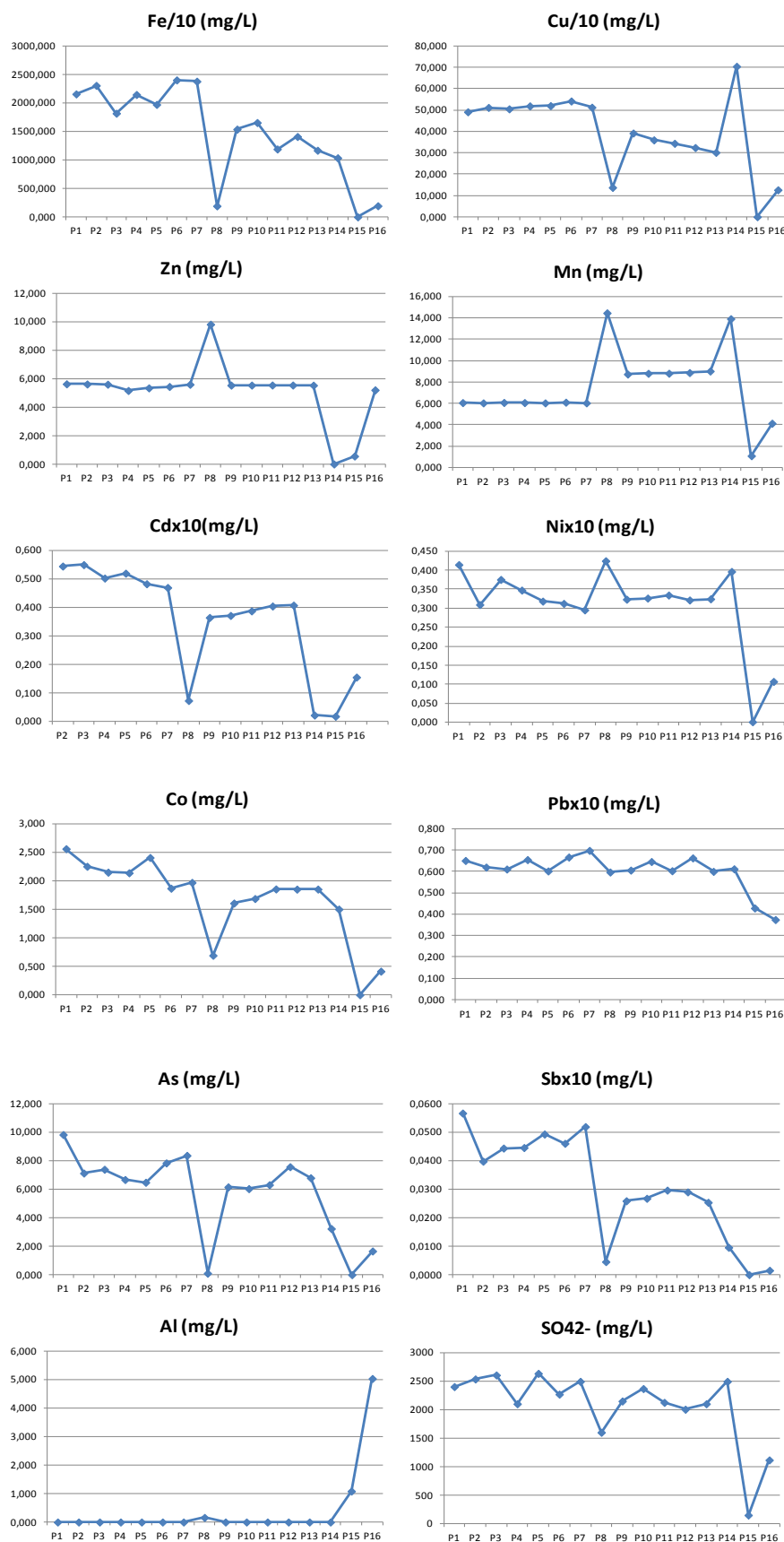


Figura 5.24. Gráfica de evolución espacial de los metales y sulfatos analizados para los diferentes puntos de muestreo en mina Poderosa (Grande *et al.*, 2014b).

La tendencia a la baja observada para los metales en P14 (Figura 5.24) puede ser una respuesta a la entrada del efluente industrial, que se produce inmediatamente aguas arriba. Al llegar a la confluencia con el arroyo Poderosa, este efluente ya ha sufrido procesos de oxidación y precipitación. Durante su curso de más de 1 km hasta la confluencia con el arroyo Poderosa, la generalidad de los metales habrán reducido su concentración, con la excepción de Mn, que necesita mayores valores de pH para precipitar (Sánchez-España *et al.*, 2006a). Además, diferencias en las litologías del encajante de las cuencas de los dos arroyos pueden contribuir a las concentraciones de Mn observadas. Los mismos fenómenos, aunque menos evidentes, pueden estar ocurriendo para el Ni.

De hecho, en el punto 14, los valores de Mn se disparan como resultado de la llegada de agua procedente de la mina de Mn “Cobullos”, situada en la misma cuenca que la mina de Cu, “El Soldado”.

P15 se encuentra considerablemente lejos de P14 (alrededor de 450 m), al contrario de lo que sucede con los puntos anteriores, que son distantes entre sí sólo 10 m. Una distancia tan larga puede justificar el fuerte descenso observado en la mayoría de los metales en P15. Por el contrario, el Mn, Cu, y Zn muestran una evidente tendencia al aumento, mientras que el Ni y Pb se comportan de forma más discreta. Éstos se pueden relacionar con la presencia de una gran escombrera situada en las inmediaciones de este lugar. En condiciones de fuertes escorrentías, los sulfuros pueden ser lixiviados, lo que justifica, también, un aumento de los sulfatos.

En cuanto al Fe(II) y Fe(III), la disminución de las concentraciones con la distancia, está de acuerdo con la presencia de precipitados de AMD, como los productos ocre. Estos precipitados típicos del AMD, retienen otros metales por procesos de adsorción, como se ha observado en otros sistemas AMD (Valente *et al.*, 2009a; Sánchez-España *et al.*, 2007).

5.3.1.5.1. Conclusiones derivadas del estudio de las muestras tomadas en el muestreo de agua llevado a cabo, de manera puntual, en mina Poderosa

En el sistema estudiado, todos los parámetros relacionados con el AMD muestran una tendencia al aumento desde la salida del túnel hasta la confluencia con el río Odiel. Los TSD y la conductividad eléctrica son dos excepciones pertinentes. Se comportan de manera similar, mostrando una tendencia decreciente y una fuerte inflexión que describe un mínimo inmediatamente después del punto de descarga (P2).

El estudio realizado pone en evidencia los procesos típicos de AMD que tienen lugar en el punto cauce. Entradas con firmas hidroquímicas distintas imponen modificaciones pertinentes en las aguas del arroyo Poderosa. Éste presenta una baja inercia hidroquímica y, en consecuencia, una alta vulnerabilidad a los estímulos externos. Además, el análisis de conglomerados se revela como una herramienta útil para identificar e interpretar las relaciones de interdependencia entre las variables de este sistema afectado por AMD.

5.3.2. Segunda campaña de muestreo

5.3.2.1. Muestreo de agua semanal en el embalse El Sancho durante todo el año hidrológico (Masa 5)

Los parámetros analizados en las muestras de agua tomadas, durante la segunda campaña de muestreo (descrita en el Capítulo 4), en el punto cola y en el punto presa del embalse El Sancho, han sido estudiados mediante sumario estadístico y funciones de correlación cruzada.

Los respectivos resultados quedan recogidos en los trabajos de Santisteban *et al.*, (2014a-b).

Sumario estadístico

Las Tablas 5.53 y 5.54 muestran los resultados del sumario estadístico correspondientes a los parámetros químicos.

Los resultados de estas tablas muestran que todos los parámetros presentan una mayor concentración media en el punto cola del embalse que en el punto presa. Los

mayores valores corresponden a los sulfatos en la cola, con una concentración media de 278 mg/L pasando, en la presa, a tener una concentración de 225 mg/L. El resto de parámetros presentan una concentración mucho menor siguiendo el siguiente orden de abundancia: Mg > Ca > Zn > Fe > Cu > Al > Pb > Ni > Cd > As > Sb. Todavía con altas concentraciones, se observa como el Mg pasa de 57,46 mg/L en cola a 44,08 mg/L en presa, y el Ca disminuye su concentración de 27,34 mg/L a 24,78 mg/L. Con valores muchos menores de concentración se encuentra el Zn, que presenta un valor medio de 3,14 mg/L en cola y 2,90 mg/L en presa; el Fe decrece de 3,69 mg/L a 1,18 mg/L; el Cu con concentraciones de 1,98 mg/L en cola a 1,05 mg/L en presa; el Al disminuye su concentración de 0,54 mg/L en cola a 0,52 mg/L en presa; el Pb mantiene su concentración de 0,16 mg/L en ambos puntos; el Ni pasando de 0,11 mg/L a 0,08 mg/L; el Cd y Sb que se mantiene con un valor de 0,60 mg/L y 0,10 mg/L, respectivamente, en ambos puntos; y el As que pasa de 0,20 mg/L a 0,10 mg/L de un punto a otro.

Respecto a los valores máximos y mínimos obtenidos en cada punto de muestreo, éstos dependen del parámetro observado. Tanto los máximos, como la desviación estándar, el rango de oscilación y el coeficiente de variación son siempre mayores en en punto cola que en el punto presa.

| | Recuento | Media | Desviación estándar | Coefficiente de variación | Mínimo | Máximo | Rango |
|---|----------|---------|---------------------|---------------------------|---------|----------|---------|
| Fe (mg/L) - Cola | 32 | 3,6875 | 2,7373 | 0,7423 | 0,4270 | 11,8800 | 11,4530 |
| Cu (mg/L) - Cola | 32 | 1,9793 | 1,9991 | 1,0100 | 0,0173 | 10,0400 | 10,0227 |
| Pb (mg/L) - Cola | 32 | 0,1600 | 0,1104 | 0,7360 | 0,0088 | 0,4210 | 0,4122 |
| Cd (mg/L) - Cola | 32 | 0,0614 | 0,0465 | 0,7580 | 0,0070 | 0,1470 | 0,1400 |
| Zn (mg/L) - Cola | 32 | 3,1391 | 2,0842 | 0,6640 | 0,3640 | 9,0660 | 8,7020 |
| Ni (mg/L) - Cola | 32 | 0,1100 | 0,0693 | 0,6298 | 0,0112 | 0,3220 | 0,3108 |
| Mg (mg/L) - Cola | 32 | 57,4596 | 28,6470 | 0,4986 | 10,1000 | 105,0000 | 94,9000 |
| Ca (mg/L) - Cola | 32 | 27,3414 | 15,0456 | 0,5503 | 7,4390 | 63,7700 | 54,3310 |
| Al (mg/L) - Cola | 32 | 0,5441 | 0,1980 | 0,3639 | 0,0904 | 0,8904 | 0,8000 |
| As (mg/L) - Cola | 32 | 0,0197 | 0,0965 | 4,9079 | 0,0000 | 0,5479 | 0,5479 |
| Sb (mg/L) - Cola | 32 | 0,0118 | 0,0255 | 2,1641 | 0,0007 | 0,1445 | 0,1438 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) - Cola | 32 | 279 | 153 | 1 | 93 | 764 | 671 |

Tabla 5.53. Sumario estadístico de los parámetros analizados en el punto cola del embalse El Sancho (Santisteban *et al.*, 2014a).

| | Recuento | Media | Desviación estándar | Coefficiente de variación | Mínimo | Máximo | Rango |
|--|----------|---------|---------------------|---------------------------|---------|---------|---------|
| Fe (mg/L) - Presa | 32 | 1,1772 | 0,5586 | 0,4746 | 0,1700 | 2,3360 | 2,1660 |
| Cu (mg/L) - Presa | 32 | 1,0500 | 0,3805 | 0,3624 | 0,1520 | 1,8100 | 1,6580 |
| Pb (mg/L) - Presa | 32 | 0,1600 | 0,0922 | 0,5698 | 0,0220 | 0,3690 | 0,3470 |
| Cd (mg/L) - Presa | 32 | 0,0622 | 0,0483 | 0,7765 | 0,0010 | 0,1380 | 0,1370 |
| Zn (mg/L) - Presa | 32 | 2,9007 | 0,8506 | 0,2932 | 1,6800 | 5,6650 | 3,9850 |
| Ni (mg/L) - Presa | 32 | 0,0773 | 0,0470 | 0,6081 | 0,0113 | 0,1700 | 0,1587 |
| Mg (mg/L) - Presa | 32 | 44,0781 | 21,2197 | 0,4814 | 9,1890 | 89,0000 | 79,8110 |
| Ca (mg/L) - Presa | 32 | 24,7758 | 8,7036 | 0,3513 | 12,7500 | 61,9600 | 51,2100 |
| Al (mg/L) - Presa | 32 | 0,5168 | 0,1486 | 0,2875 | 0,2379 | 0,7848 | 0,5469 |
| As (mg/L) - Presa | 32 | 0,0053 | 0,0180 | 3,3668 | 0,0000 | 0,0999 | 0,0999 |
| Sb (mg/L) - Presa | 32 | 0,0061 | 0,0067 | 1,1064 | 0,0012 | 0,0257 | 0,0245 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) - Presa | 32 | 226 | 47 | 0 | 138 | 284 | 146 |

Tabla 5.54. Sumario estadístico de los parámetros analizados en el punto presa del embalse El Sancho (Santisteban *et al.*, 2014a).

Los parámetros que presentan mayor porcentaje de reducción (Figura 5.25) desde el punto cola hasta el punto presa son el Fe (70%), As (50%) y Cu (47%). El resto varía su concentración en menor medida presentando el Ni un porcentaje del 27%; el Mg un 24%; los sulfatos disminuyen en un 20%; el Ca en un 10%; el Zn varía en un 7% y el Al lo hace en un 4%. Se puede observar como el Cd, Sb y Pb mantienen sus valores entre ambos puntos sin variar sus concentraciones.

Estas variaciones son muy similares, excepto para el Cd, a las expuestas por de la Torre *et al.*, (2014b) en su trabajo, donde se describe la capacidad de atenuación de la carga metálica en este mismo embalse entre el punto cauce y el punto cola.

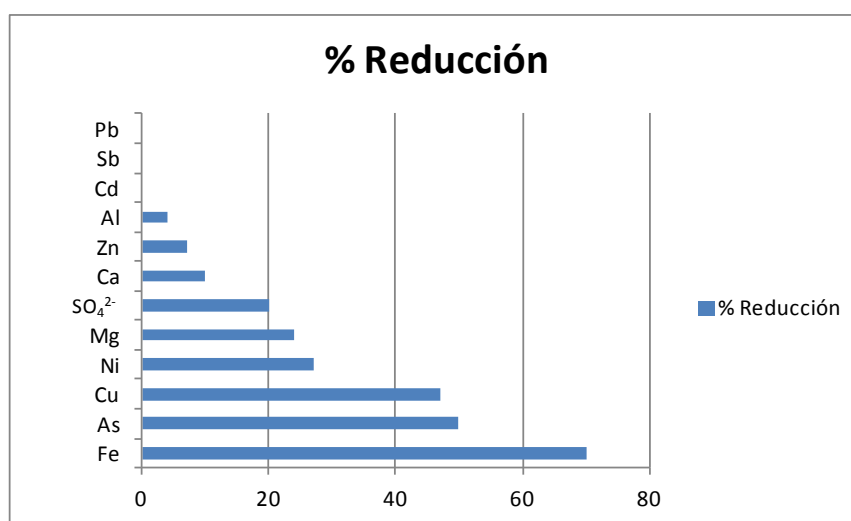


Figura 5.25. Representación del porcentaje de reducción de la concentración de los parámetros entre la cola y la presa del embalse El Sancho (Santisteban *et al.*, 2014a).

Funciones de correlación cruzada (FCC)

La Figura 5.25 presenta el resultado gráfico del empleo de las funciones de correlación cruzada entre pares de variables relativos a los puntos presa y cola.

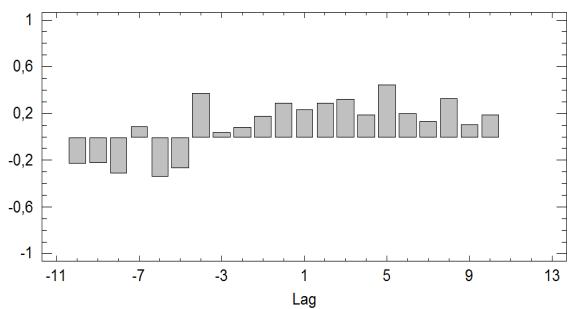
La representación gráfica de la Figura 5.26 muestra que la mayoría de los parámetros se encuentran muy relacionados en ambos puntos alcanzándose algunas correlaciones próximas a 1, como es el caso del Pb y As. El Cd llega a alcanzar una correlación de 0,9 entre ambos puntos, mientras que el Mg y Zn alcanza un máximo de 0,7. Para el resto de parámetros se observa una correlación en torno a 0,6, siendo el Fe el que peor correla, con un valor de 0,2, probablemente ante la persistencia dentro del propio embalse de fenómenos de hidrólisis, precipitación y/o disolución.

El máximo de correlación tiene lugar en un tiempo $t=0$ (menor a una semana) por la mayoría de las variables (Pb, As, Sb, Cd, Mg, Al, As), es decir, el aumento o disminución de las concentraciones de estos elementos en un punto respecto al otro, se refleja en un tiempo inferior a una semana. Existen casos como el Cu o Ni que alcanza dicho máximo una semana después, el Fe y Ca que lo hacen en $t=2$, o los sulfatos que alcanzan el máximo en $t=3$.

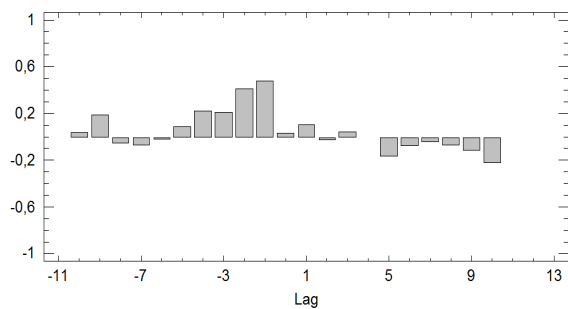
Se observa como el orden en que los parámetros disminuyen su concentración no se encuentra relacionado con el orden en que lo hace el porcentaje de reducción ni con el tiempo de tránsito, ya que estos dos últimos dependerán de los procesos de precipitación, adsorción y dilución que sufran cada uno de ellos.

CAPITULO 5: RESULTADOS, DISCUSION Y CONCLUSIONES PARCIALES OBTENIDAS MEDIANTE TRATAMIENTO GRAFICO-ESTADISTICO Y LOGICA BORROSA

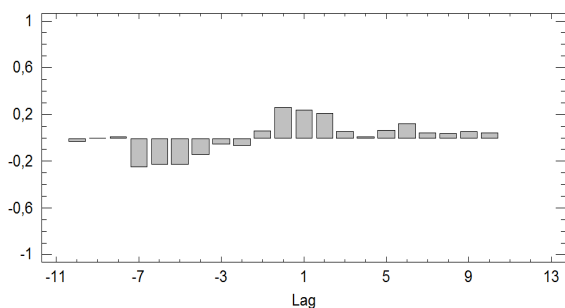
Correlaciones cruzadas Co Cola- Co Presa



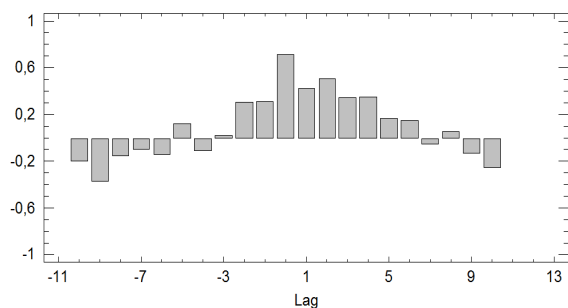
Correlaciones cruzadas Cu Cola- Cu Presa



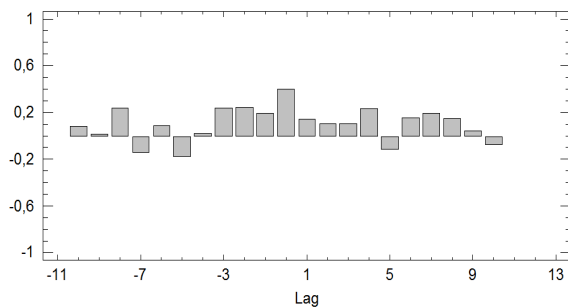
Correlaciones cruzadas Fe Cola- Fe Presa



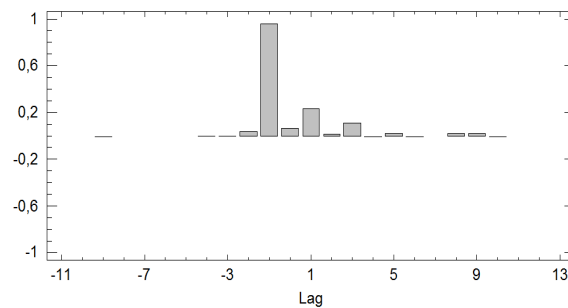
Correlaciones cruzadas Mg Cola- Mg Presa



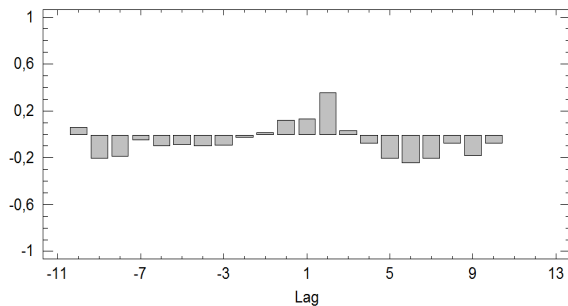
Correlaciones cruzadas Al Cola- Al Presa



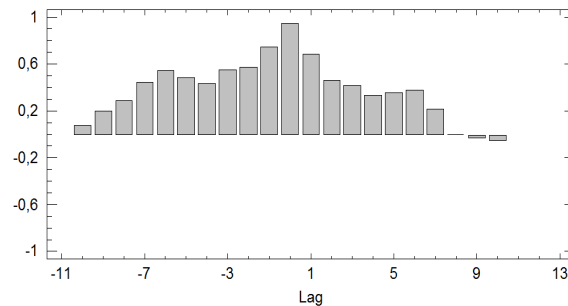
Correlaciones cruzadas As Cola- AlsPresa



Correlaciones cruzadas Ca Cola- Ca Presa



Correlaciones cruzadas Cd Cola- Cd Presa



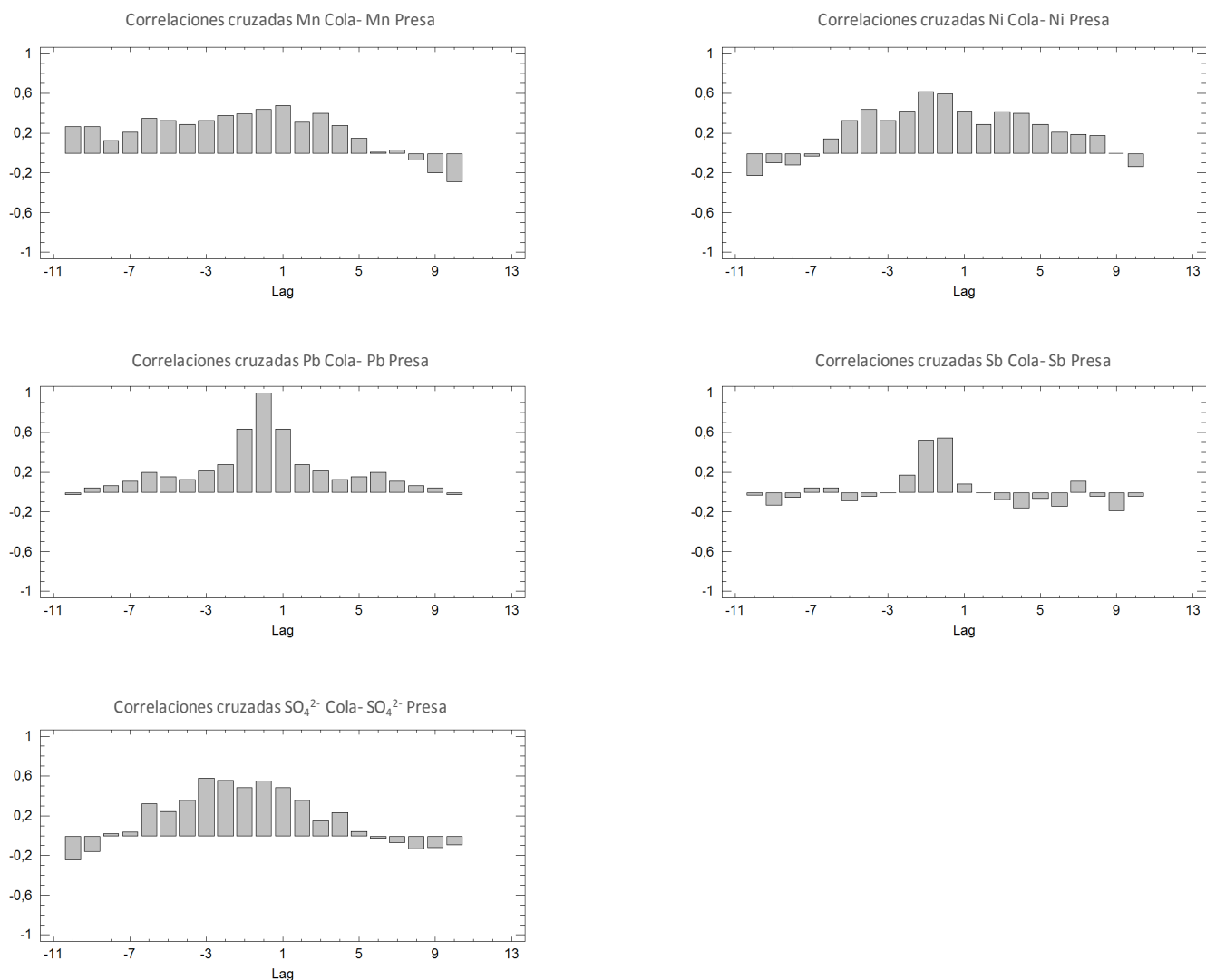


Figura 5.26. Funciones de correlación cruzada de las variables analizadas entre los dos puntos de muestreo (cola y presa) en el embalse El Sancho (Lag: 1 semana) (Santisteban *et al.*, 2014a).

5.3.2.1.1. Conclusiones derivadas del estudio de las muestras tomadas en el muestreo de agua semanal en el embalse El Sancho durante todo el año hidrológico

Las concentraciones de metales y sulfatos medidas en el embalse El Sancho ponen en evidencia su afección por drenaje ácido de mina, observándose una mayor abundancia de la carga contaminante en la cola del embalse que en la presa, debido a la atenuación de ésta en el transcurso entre ambos puntos. Esta atenuación es consecuencia de la precipitación de oxihidroxisulfatos de hierro producida por la elevación del pH, así como de los subsiguientes fenómenos de sorción y dilución.

El hecho de que la desviación estándar, el rango de oscilación o el coeficiente de variación sean mayor en la cola que en la presa se debe a que la presa presenta una “inercia química” (Grande *et al.*, 2010b; Santisteban *et al.*, 2014) mucho mayor que en la cola, debido al gran volumen de agua, y por tanto, será menos sensible a las variaciones debidas a estímulos externos.

La función de correlación cruzada permite conocer las relaciones de temporalidad causa-efecto entre parámetros hidroquímicos una vez incorporados al embalse, así como la determinación de los tiempos de respuesta ante estímulos externos, además de cuantificar el proceso de avance de la contaminación desde la cola a la presa. Así, se puede proponer que el tiempo de tránsito de los contaminantes es inferior a una semana para la mayoría de los casos, debido a la pequeña distancia que existe entre ambos puntos (unos 300 metros), lo que implica que aumentos o disminuciones de un parámetro en la cola, tiene su consecuencia en un periodo inferior a una semana en el punto presa aunque existen parámetros en el que este tiempo es algo mayor, lo que dependerá de la capacidad de dilución del elemento (Santisteban *et al.*, 2014a).

5.3.2.2. Parámetros físico-químicos obtenidos de las sondas multiparamétricas instaladas en la cola y en la presa del embalse El Sancho durante todo el año hidrológico (Masa 6)

La masa de datos obtenida de la monitorización de los puntos cola y presa en el embalse El Sancho, ha sido tratada mediante sumario estadístico, funciones de correlación cruzada y funciones de autocorrelación.

Del tratamiento de estos datos resulta el trabajo de de la Torre *et al.*, (2014b).

Sumario estadístico

La Tabla 5.55 muestra los resultados del sumario estadístico correspondiente a la masa de datos obtenidos de forma automática por las dos sondas multiparamétricas instaladas en la cola y en el muro de la presa, respectivamente, tal como se ha descrito en el Capítulo 4.

La matriz de datos está constituida por 183 valores, que se corresponden con el número de días de muestreo, y es el resultado del cálculo previo del valor medio diario de cada variable en observación, tomadas por las sondas en intervalos de 30 minutos. Estos 183 días son los que el cauce transportó agua en ese año hidrológico hasta la presa, terminando el muestreo al dejar de correr el agua.

| | pH Cola | pH Presa | Cond. Cola ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | Cond. Presa ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | T ^a Cola (°C) | T ^a Presa (°C) | Lluvia (mm) |
|----------------------------|---------|----------|---|--|-----------------------------|------------------------------|----------------|
| Recuento | 183,0 | 183,0 | 183,00 | 183,00 | 183,0 | 183,0 | 183 |
| Promedio | 4,2 | 4,1 | 750,84 | 599,52 | 14,5 | 15,3 | 40 |
| Varianza | 1,2 | 0,0 | 80761,50 | 2127,29 | 11,4 | 14,2 | 7495 |
| Desviación Estándar | 1,1 | 0,2 | 284,19 | 46,12 | 3,4 | 3,8 | 87 |
| Coficiente de Variación | 0,3 | 0,0 | 0,38 | 0,08 | 0,2 | 0,2 | 21526 |
| Mínimo | 2,7 | 3,7 | 267,77 | 562,56 | 9,8 | 9,8 | 0 |
| Máximo | 7,6 | 4,3 | 2427,34 | 680,27 | 24,0 | 24,1 | 450 |
| Rango | 4,9 | 0,6 | 2159,56 | 117,71 | 14,2 | 14,3 | 450 |

Tabla 5.55. Sumario estadístico de los parámetros medidos por las dos sondas multiparamétricas instaladas en la cola y el muro de la presa del embalse El Sancho (Lluvia: Datos de precipitación acumulada obtenida de la estación meteorológica de Alosno) (de la Torre *et al.*, 2014b).

Se observa como el valor medio de la conductividad en cola es significativamente más alto que en la presa, con un valor cercano a 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$, al tiempo que el pH medio anual es 0,2 unidades superior en cola que en presa.

En relación con los valores mínimos y máximos, tanto de pH como de conductividad, muestran valores siempre mucho más extremos en cola que en presa. Si se observan los valores mínimos y máximos de pH en ambos puntos, se puede ver cómo en el caso de la cola, el valor máximo llega hasta la neutralidad, pudiendo ser consecuencia de los momentos de lluvia máxima en los que la sonda está midiendo prácticamente agua de lluvia, cosa que no ocurre en la presa.

El rango de oscilación de valores medios de la conductividad en cola es casi 19 veces superior al de la presa, mientras que para el pH este valor es 8 veces mayor.

En relación con la varianza, tanto para el pH como para la conductividad, los valores mucho más altos detectados en la cola, obedecen a la rápida respuesta de las respectivas masas de agua. La “inercia hidroquímica” (Grande *et al.*, 2010b) es mucho mayor en el punto presa, consecuencia de la mayor profundidad y masa de agua que

en la cola y de la distancia mayor al punto de entrada al foco contaminante. Esto conlleva a que la dispersión de valores alrededor del promedio (varianza) en este escenario es mucho mayor en la cola que en la presa, al ser más sensible a las fluctuaciones del valor que toman el pH y la conductividad ante el estímulo inducido por las aguas aportadas al embalse. Esto hecho se traduce en valores extremos de acidez y conductividad más altos en época no lluviosa cuando todavía aportan aguas extremadamente contaminadas los cauces mineros, y aguas con menor grado de afección que la media anual del embalse cuando las precipitaciones son torrenciales y no hay tiempo de residencia en las escombreras y por tanto escasa lixiviación, con lo que las aguas aportadas durante las avenidas elevan el pH. Este fenómeno afecta lógicamente de manera diferente en el tiempo a cada escenario muestreado.

Lo dicho en el párrafo anterior, queda corroborado por los valores más extremos que toman, además de la varianza, los máximos y mínimos de conductividad y pH medidos en la cola.

Funciones de auto-correlación (FAC)

Las Figuras 5.27 y 5.28 muestran los resultados relativos a la aplicación de la función de auto-correlación para las variables pH y conductividad, en los puntos de medida.

En relación con el pH, la función de autocorrelación de la Figura 5.26, utilizando medidas a intervalos de 30 minutos, informa de la existencia de una memoria para el sistema en la cola del embalse de 360 minutos, correspondientes al corte en $k=12$. Para la presa, el punto de corte se desplaza sensiblemente a la derecha llegando hasta 510 minutos, es decir, 150 minutos más en presa que en cola.

Para la conductividad (Figura 5.27), este desplazamiento es aún mayor que para el pH, mostrando una memoria de solo 120 minutos en cola y alcanzando un valor de 450 minutos en presa, es decir, casi 4 veces el valor del primero.

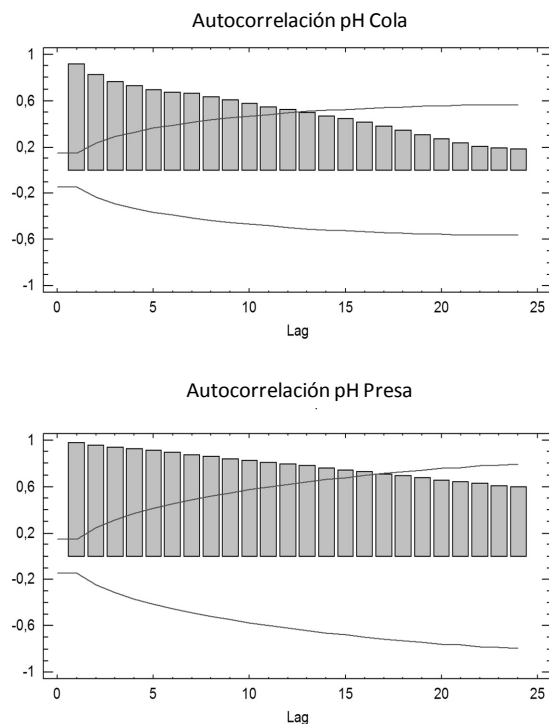


Figura 5.27. Función de auto-correlación para el pH en el punto cola y en el punto presa del embalse El Sancho (Lag: 30 minutos) (de la Torre *et al.*, 2014b).

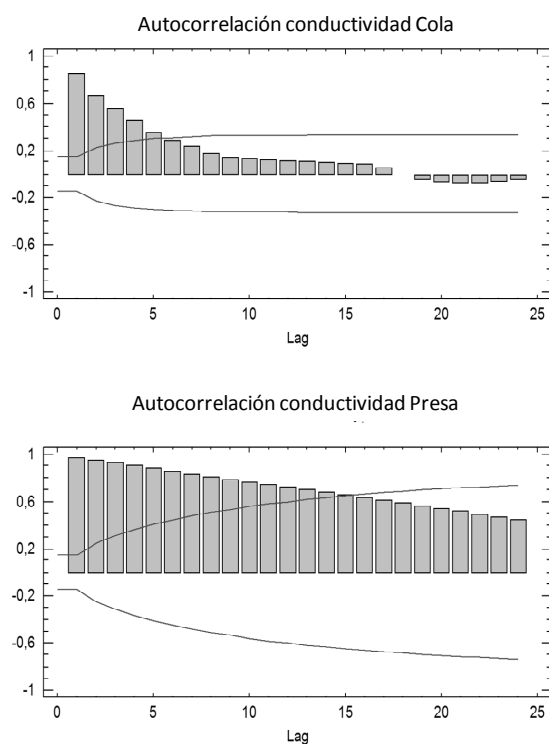


Figura 5.28. Función de autocorrelación para la conductividad en la cola y en la presa del embalse El Sancho (Lag: 30 minutos) (de la Torre *et al.*, 2014b).

Funciones de correlación cruzada (FCC)

Las figuras 5.29 y 5.30 muestran los resultados relativos a la aplicación de la función de correlación cruzada para las variables pH y conductividad, en los dos puntos de medida.

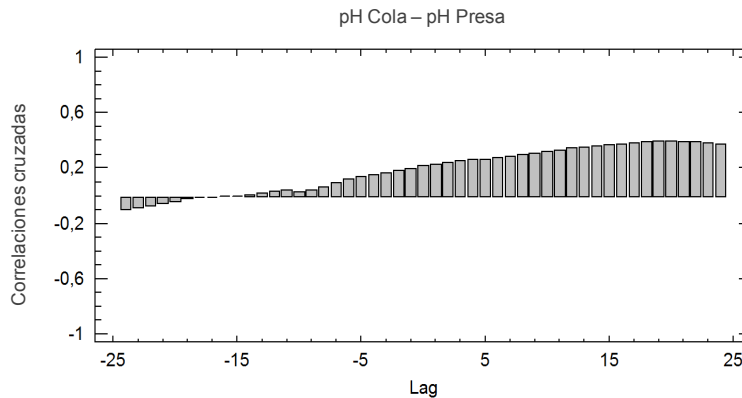


Figura 5.29. Función de correlación cruzada para el pH en la cola y en la presa del embalse El Sancho (Lag: 30 minutos) (de la Torre *et al.*, 2014b).

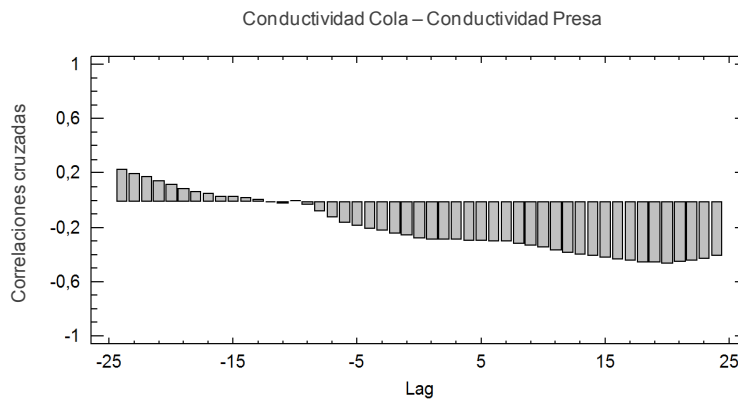


Figura 5.30. Función de correlación cruzada para la conductividad en la cola y en la presa del embalse El Sancho (Lag: 30 minutos) (de la Torre *et al.*, 2014b).

La función de correlación cruzada advierte de la existencia de coeficientes de correlación discretos pero significativos entre los valores relativos a cada punto de muestreo (cola y presa) para el pH y para la conductividad. Las gráficas aparecen sin inflexiones notables y tendencias muy marcadas en ambos casos, indicando unas medidas coherentes y sin outliers. Despierta especial interés la existencia de un máximo de correlación desfasado 510 minutos respecto al instante de muestreo, tanto

para conductividad como para pH, observables en los valores de correlación cruzada donde se visualiza el pico de máxima correlación en ese instante.

5.3.2.2.1. Conclusiones derivadas del estudio de los parámetros físico-químicos obtenidos de las sondas multiparamétricas instaladas en la cola y en la presa del embalse El Sancho durante todo el año hidrológico

El sumario estadístico pone en evidencia grandes diferencias en la físico-química del agua en la presa y en la cola del embalse, como consecuencia de la existencia de un proceso de dispersión y tránsito de contaminantes, con origen en la entrada de los mismos a través de la cola. De esta forma, si atendemos a los promedios anuales de conductividad, que muestra valores más altos en la cola que en la presa, éstos obedecen esencialmente a un mecanismo muy simple de disolución de las aguas de entrada ante el gran volumen de la cuenca receptora (Grande *et al.*, 2010a; Santisteban *et al.*, 2014a-b).

Cada uno de los escenarios, queda, con el sumario estadístico, caracterizado por las variables en estudio, con diferencias muy notables de uno a otro, que obedecen a los procesos que tienen lugar ya dentro del embalse, que funciona como medio receptor de aguas ácidas de mina y sujeto a los procesos de dilución, como consecuencia de la llegada de un caudal con variaciones composicionales en función de la época del año en que se considere.

Las funciones de autocorrelación para el pH y la conductividad en cada escenario de muestreo, vuelven a servir de argumento para soportar las afirmaciones anteriores, mientras que la función de correlación cruzada permite proponer que el tiempo de tránsito de la onda de dispersión es de 510 minutos (8,5 horas) desde cola hasta presa, referido a valor medio anual, y entendiendo que en función de las precipitaciones y/o potenciales alteraciones en la química de los aportes ácidos, se producirán variaciones.

Para más abundar, se puede llegar a determinar el valor de la velocidad de forma sencilla: conocido el tiempo de llegada de la onda contaminante desde cola a presa (510 minutos), y conocida la distancia entre uno y otro punto de medida (14500 metros), basta con dividir ambos valores para obtener la velocidad que arroja un valor de 0,47 m/s.

5.4. APLICACION DE TECNICAS DE FUZZY LOGIC

5.4.1. Muestreo de agua llevado a cabo de manera puntual en mina Poderosa durante el primer año hidrológico (Masa 4)

Las Figuras 5.31 y 5.32 muestran las reglas borrosas obtenidas para las variables analizadas en las muestras de agua tomadas en los diferentes puntos de muestreos definidas en mina Poderosa, tomando respectivamente, el potencial redox (Figura 5.31) y el pH (Figura 5.32) como consecuente.

La aplicación de técnicas de fuzzy logic a esta masa de datos permite ampliar los modelos de caracterización hidroquímica propuestos previamente en el Apartado 5.3.1.5, usando la estadística clásica. De este estudio resulta el trabajo de de la Torre *et al.*, (2014c).

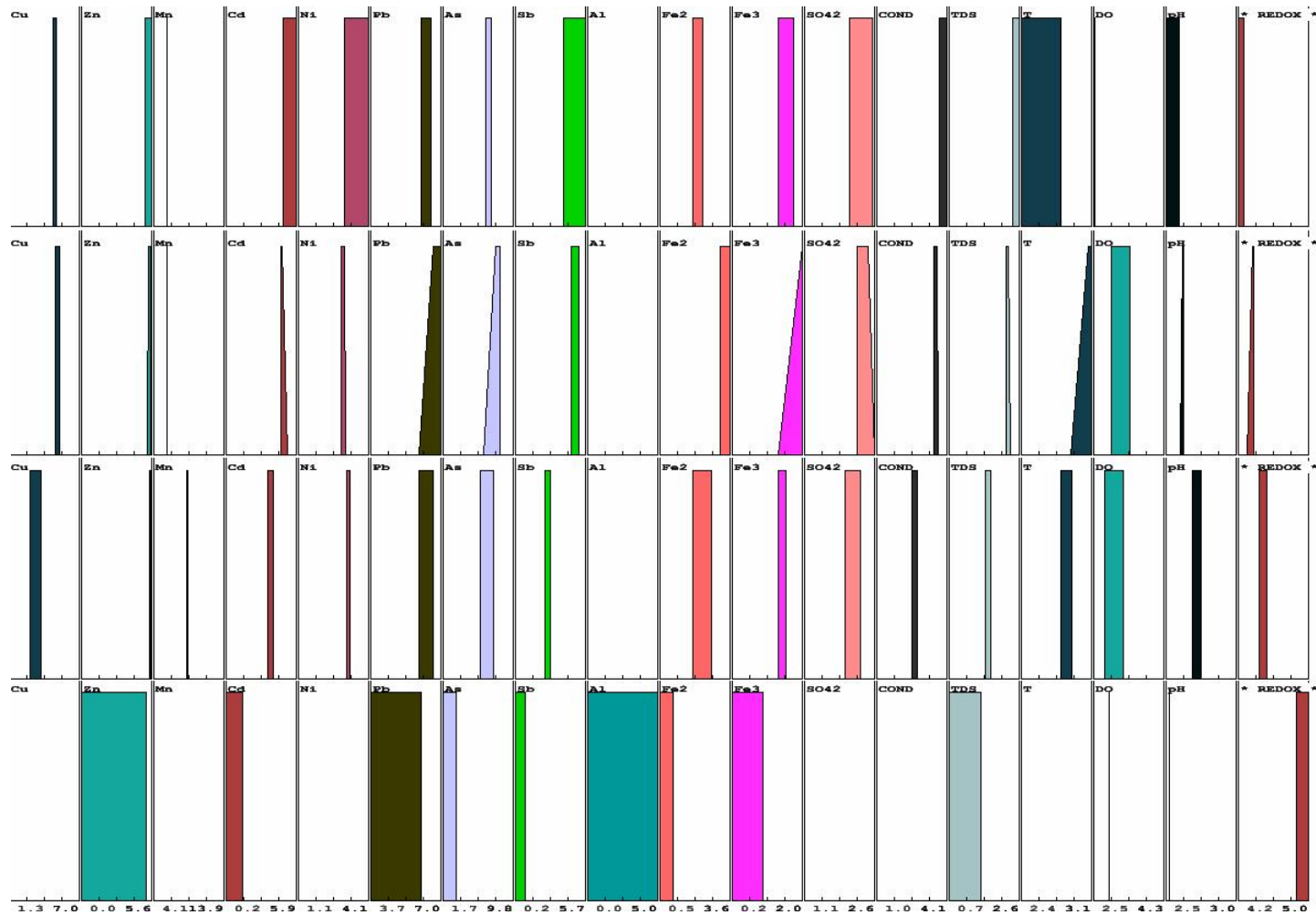


Figura 5.31. Reglas borrosas obtenidas para las variables analizadas en las muestras de agua tomadas en mina Poderosa, tomando el potencial redox como consecuente (de la Torre *et al.*, 2014c).

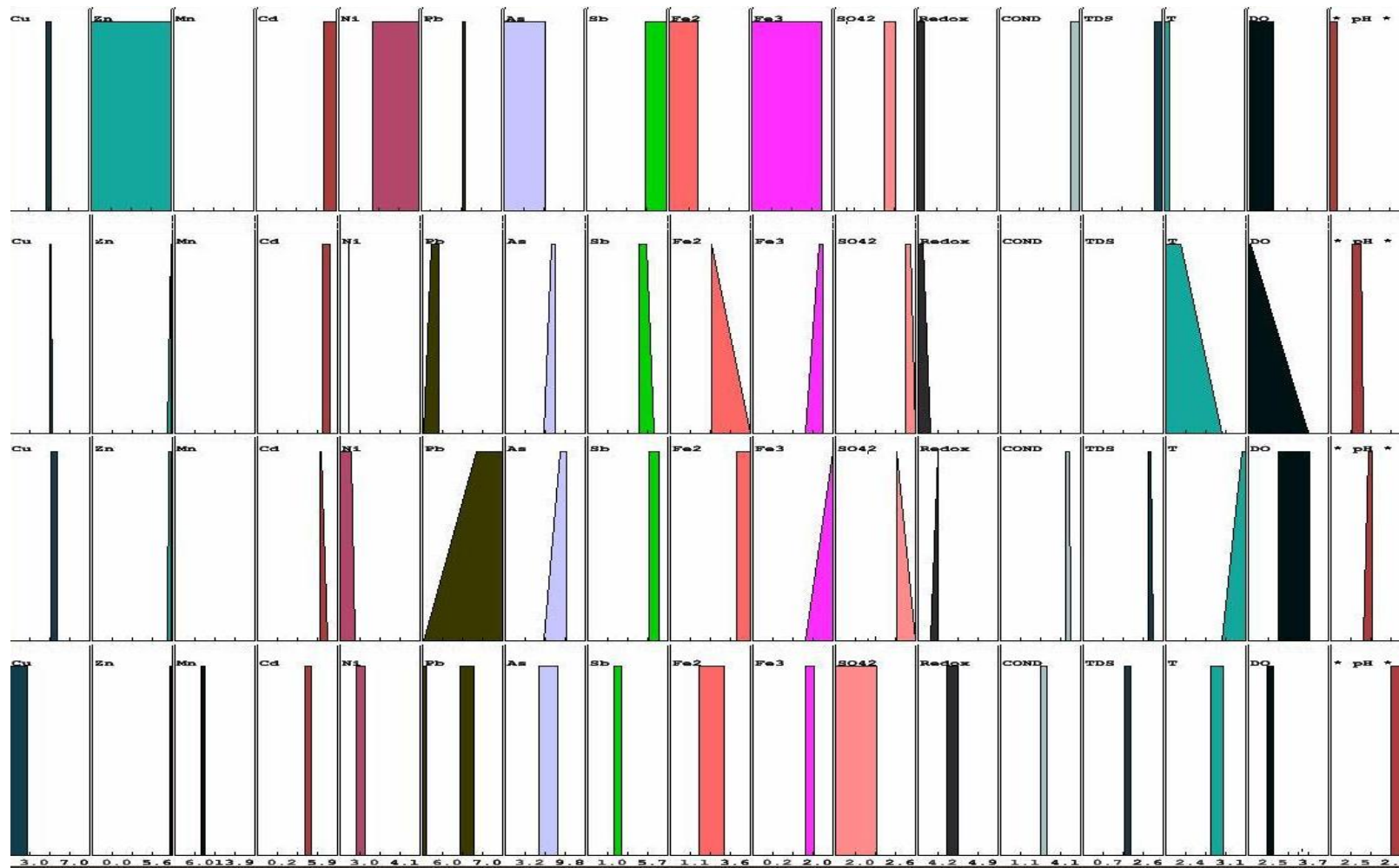


Figura 5.32. Reglas borrosas obtenidas para las variables analizadas en las muestras de agua tomadas en mina Poderosa, tomando el pH como consecuente (de la Torre *et al.*, 2014c).

La Figura 5.31 muestra los valores tomados por los diversos parámetros, tomando el potencial redox como el consecuente.

Cabe destacar que el Cd, Ni, As, Sb, sulfatos, conductividad y TSD se comportan de manera similar, es decir, cuando el redox presenta valores extremo-altos, estos parámetros se caracterizan por tener valores extremo-bajos y cuando el redox disminuye, los parámetros citados tienden a aumentar su valor, siempre de manera muy concentrada, hasta que el redox alcanza valores extremo-bajos, momento en el que estos parámetros presentan valores extremo-altos, muy concentrados.

En cuanto al Fe(II) y Fe(III), presentan un comportamiento similar en respuesta a las variaciones del potencial redox, es decir, cuando el redox disminuye, los valores de estos parámetros aumentan, pero cuando el redox toma valores extremo-bajos, el Fe(II) y Fe(III), toman valores que van de medio a medio-alto.

En cuanto al pH y OD, presentan una evolución similar a la del redox, excepto para aquellos momentos cuando el redox toma valores extremo-altos, en el que estos dos parámetros presentan valores bajos para el OD, y extremo-bajos para el pH.

En el caso del Zn y Al, no se observa ninguna relación con las variaciones del potencial redox. Cuando éste último presenta valores extremo-bajos, ambos cationes pueden tener prácticamente ningún valor. Sin embargo, en todos los demás casos, tanto el Zn, como el Al se encuentran con valores máximos de concentración.

En cuanto al Mn, se puede observar un comportamiento similar al del potencial redox, a excepción de cuando el redox presenta valores extremo-bajos, que el Mn presenta valores bajos.

La Figura 5.32 muestra los valores que pueden tomar todos los parámetros, tomando, en este caso, el pH como consecuente.

Se observa que el Cd, Ni, Sb, conductividad y TSD, presentan alguna relación con el pH, decreciendo sus concentraciones a medida que aumenta la concentración de pH. Este hecho es más claro en el caso de Ni.

Por otro lado, el As, Fe(II), Fe(III), OD y los sulfatos aumentan sus concentraciones a medida que aumenta el pH, aunque hay que especificar que, cuando el pH presenta valores extremo-altos, estos metales no alcanzan sus valores máximos, sino más bien, las concentraciones se mantienen en valores medios, incluso los sulfatos pueden presentar valores que van de bajos a extremo-bajos.

El Cu, Zn, Mn y Pb no parecen verse afectados por el aumento o disminución de los valores de pH.

5.4.1.1. Conclusiones derivadas del estudio de las muestras tomadas en el muestreo de agua llevado a cabo de manera puntual en mina Poderosa durante el primer año hidrológico

De los resultados anteriores se desprende que, en el caso del Cd, Ni, Sb y TSD, éstos presentan un comportamiento similar en cuanto a las variaciones del pH y del potencial redox, aunque de forma inversa. Cuando el pH y el potencial redox aumentan sus valores, las concentraciones de dichos metales disminuyen.

Por otro lado, el Fe(II), Fe(III) y los sulfatos, presentan un comportamiento completamente diferentes con respecto al potencial redox y al pH, aumentando sus concentraciones cuando el potencial redox disminuye, y cuando el pH aumenta, y manteniéndose en valores medios cuando redox presenta valores extremo-bajos y cuando el pH presenta valores extremo-altos. Esto podría explicarse por el hecho de que los valores extremo-altos de pH se encuentran, en este caso, entre 3,04 y 4,0, siendo estos valores del pH en torno al cual el Fe(II) se oxida a Fe(III), y posteriormente precipita como oxihidroxisulfatos de hierro (Asta *et al.*, 2010).

Los valores tomados por el As se pueden explicar por la adsorción de As a las fases sólidas de Fe. Este proceso incluye la oxidación del Fe(II), seguido de la hidrólisis y de la precipitación del Fe(III) en forma de schwertmannita (Sánchez-España *et al.*, 2006). Durante estas etapas, los elementos traza están totalmente o parcialmente absorbidos, y/o coprecipitan a diferentes velocidades dependiendo, básicamente, del pH, así como de la actividad de los aniones de SO_4^{2-} (quien determina la especiación de los metales) (Sánchez-España *et al.*, 2006).

5.4.2. Parámetros físico-químicos obtenidos de las sondas multiparamétricas instaladas en el punto cola y punto presa en el embalse Sancho durante todo el segundo año hidrológico (Masa 6)

En este apartado se emplea la herramienta fuzzy logic para estudiar los datos obtenidos de las sondas multiparamétricas situadas en la cola y en la presa del embalse El Sancho durante el segundo año hidrológico en estudio.

La aplicación de técnicas de fuzzy logic para caracterizar procesos hidroquímicos en el mismo sector y basado en el mismo volumen de datos que los utilizados en el presente trabajo en el Apartado 4.1.2.2, permite ampliar los modelos de trabajo propuestos previamente usando estadística clásica. De esta manera, no solo puede establecerse si un parámetro está relacionado con otro, sino en qué medida están relacionados sobre la base de su desarrollo en toda la gama de las variables. De este estudio resulta el trabajo de Santisteban *et al.*, (2014c).

Las figuras 5.33, 5.34, 5.35 y 5.36 muestran las reglas borrosas obtenidas a partir de la masa de datos de dichas sondas multiparamétricas, las cuales describen el comportamiento de las variables en estudio: lluvia (Rainfall), pH, conductividad (Cond), temperatura (T) y periodo de muestreo expresado en meses (Month).

De esta forma, en las gráficas se representan en cada una de ellas, 6 filas y 5 columnas, que recogen la información transportada por las variables en estudio. La última columna de la derecha representa el consecuente y el resto de ellas, los antecedentes, es decir, lo que muestran estas gráficas es como se comportan los parámetros considerados antecedentes en función del valor que toma el consecuente.

Nótese como, para cada regla borrosa, las variables afectadas muestran en la parte inferior de la figura geométrica que representa su grado de dispersión, unos valores numéricos que se corresponden con el universo de discurso de la variable en cuestión, lo que en términos de estadística clásica es conocido como rango o amplitud de la variable.

El carácter semicuantitativo de esta herramienta, aplicada a los escenarios descritos, permite la ordenación en 5 clases, en función de los valores que toma cada variable dentro de su propio universo de discurso. Así, se contemplan las posibilidades de existencia de valores extremo-bajo, bajo, medio, alto y extremo-alto, con todas las combinaciones intermedias posibles que provocan la aparición de dispersiones medio-bajo y medio-alto.

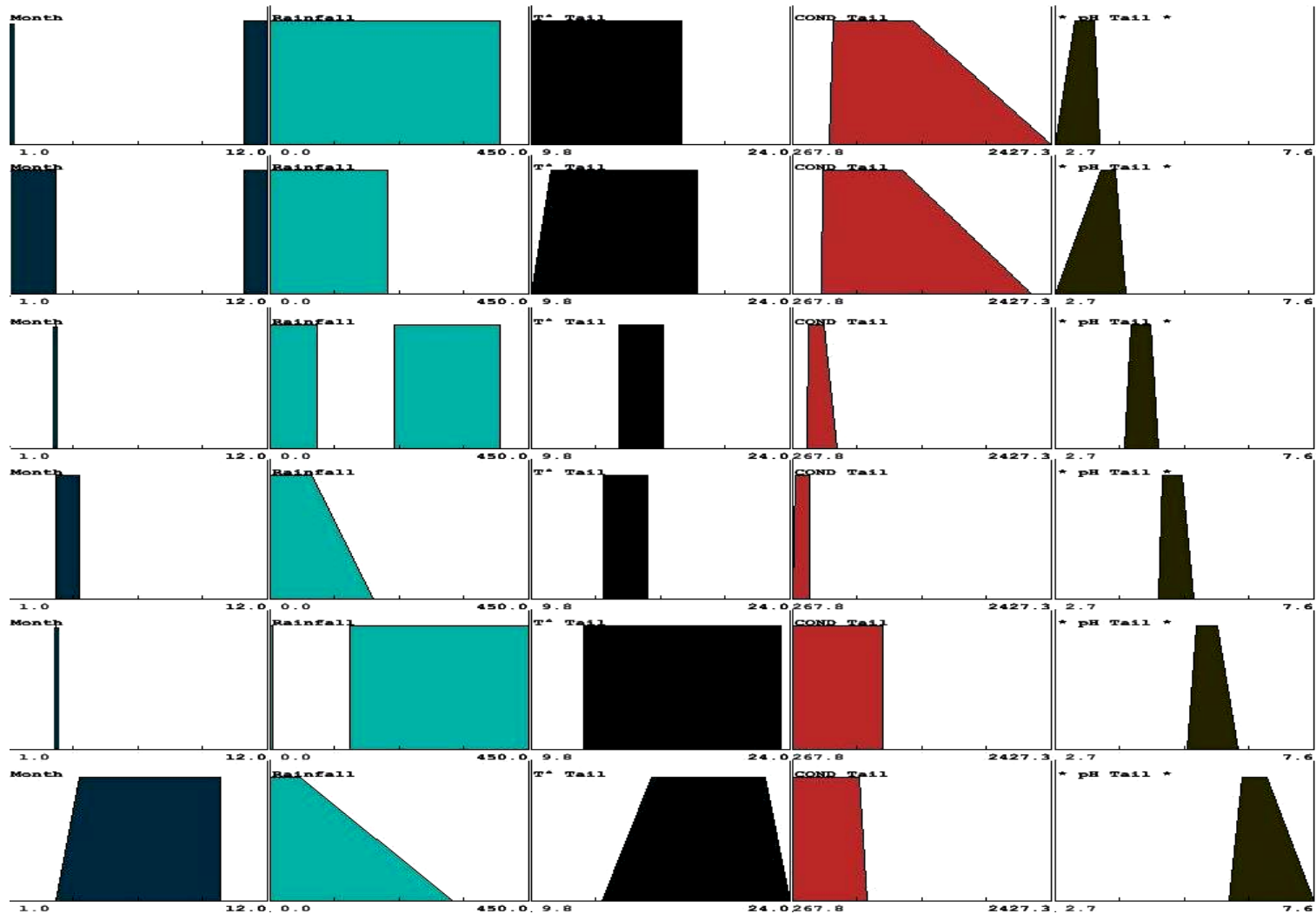


Figura 5.33. Reglas borrosas obtenidas para la cola del embalse El Sancho, tomando el pH como consecuente y el resto de variables como antecedentes (Santisteban *et al.*, 2014c).

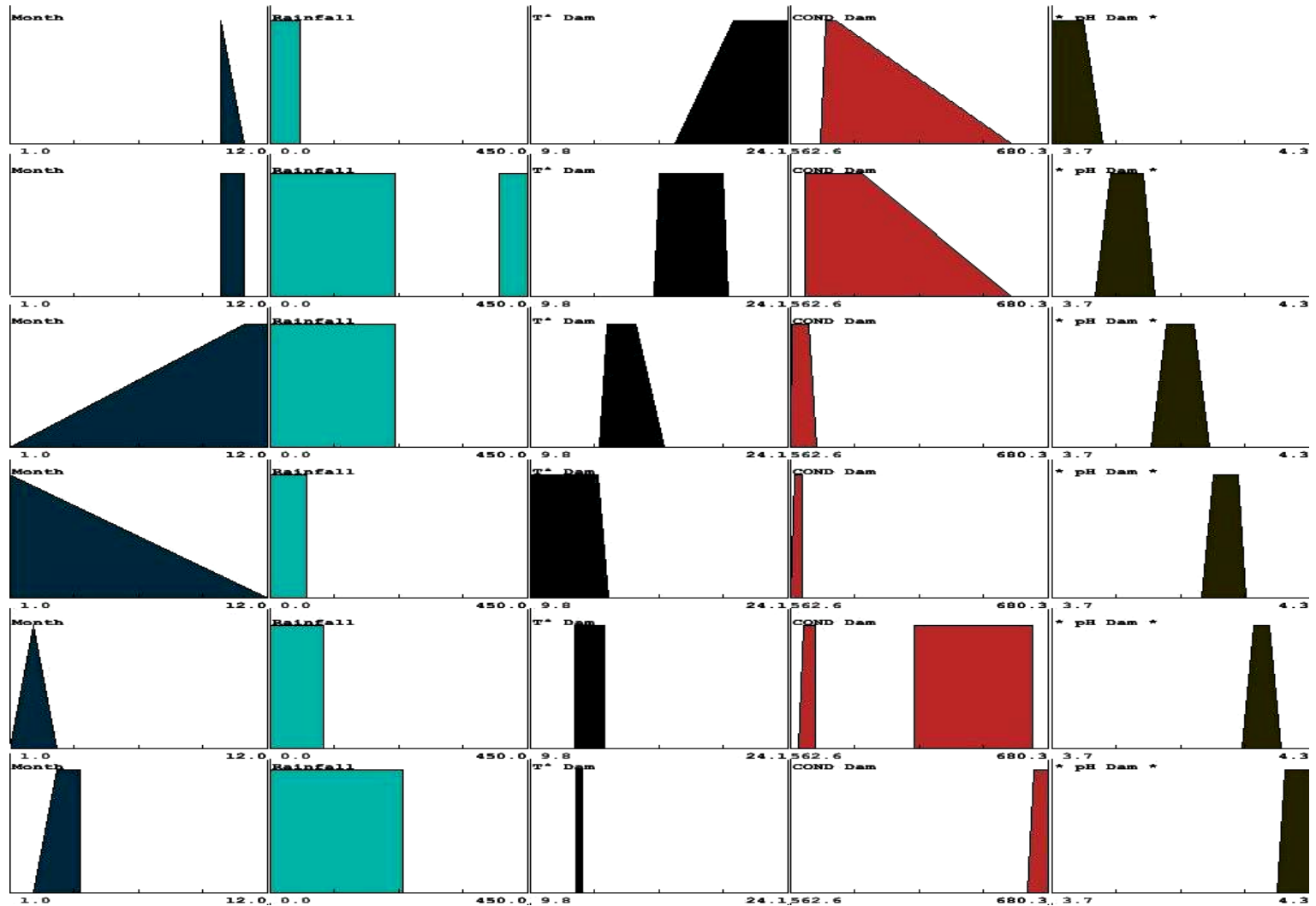


Figura 5.34. Reglas borrosas obtenidas para la presa del embalse El Sancho, tomando el pH como consecuente y el resto de variables como antecedentes (Santisteban *et al.*, 2014c).

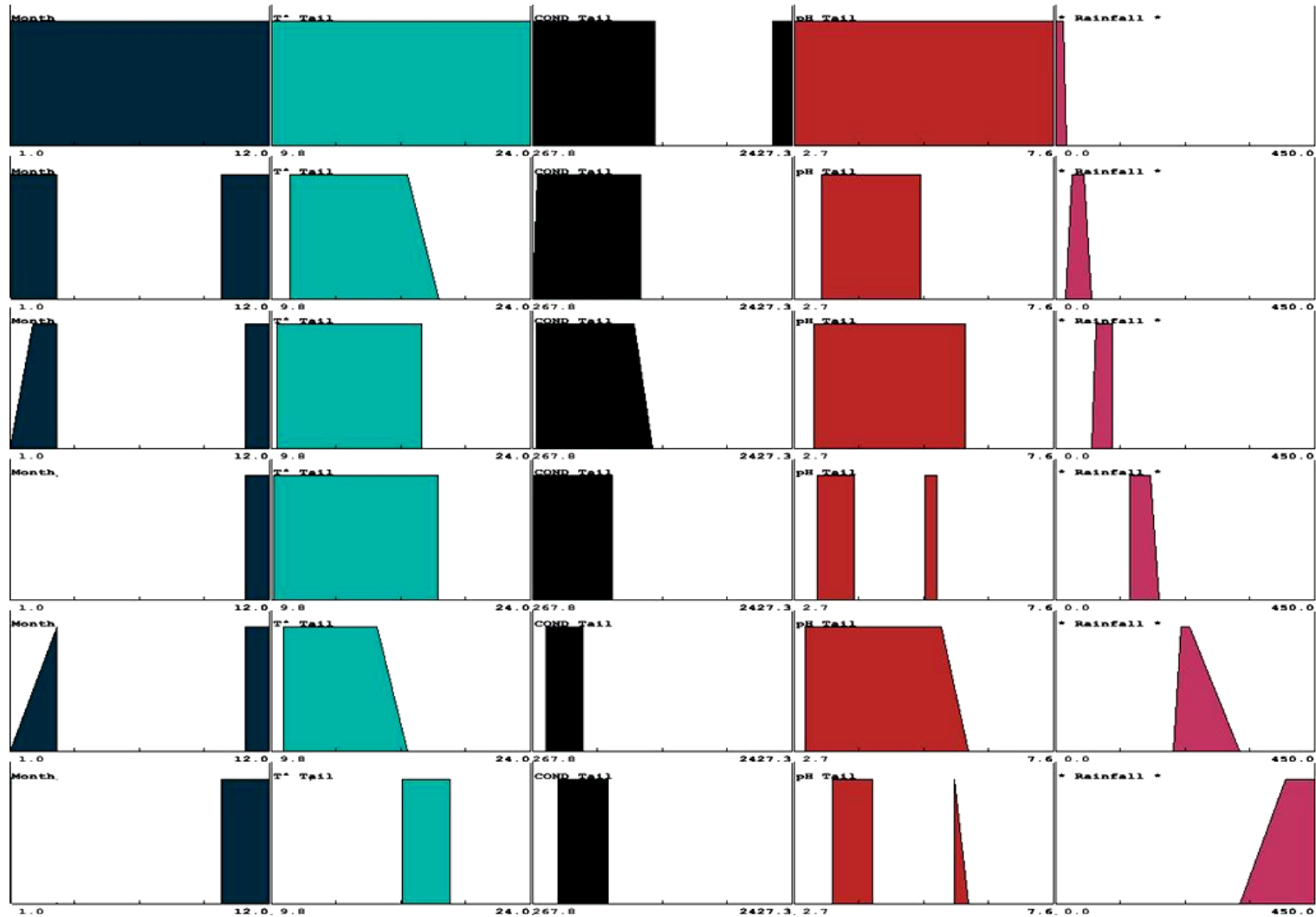


Figura 5.35. Reglas borrosas obtenidas para la cola del embalse El Sancho, tomando la lluvia como consecuente y el resto de variables como antecedentes (Santisteban *et al.*, 2014c).

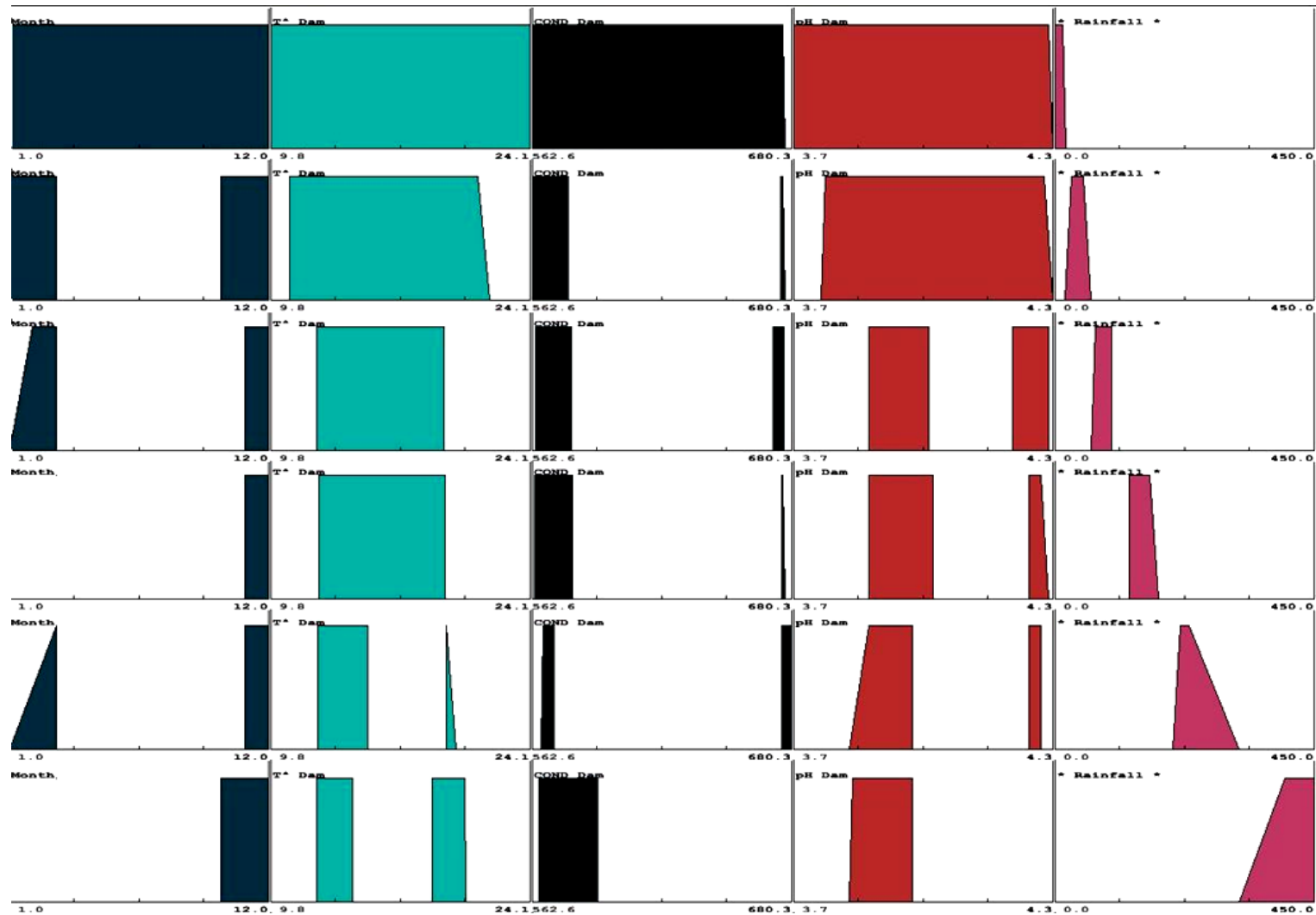


Figura 5.36. Reglas borrosas obtenidas para la presa del embalse El Sancho, tomando la lluvia como consecuente y el resto de variables como antecedentes (Santisteban *et al.*, 2014c).

La Figura 5.33 muestra las reglas obtenidas para la cola del embalse tomando como consecuente el pH. Se puede observar un comportamiento similar del pH con la temperatura y con los meses, de modo que el pH aumenta su valor conforme lo hacen los meses y la temperatura. En cambio la conductividad presenta un comportamiento opuesto, disminuyendo sus valores a medida que el pH va aumentando. Cabe destacar que a valores de pH medios, tanto la conductividad como la temperatura toman valores muy concentrados que van de bajo a extremo bajo, y de medio a bajo, respectivamente. Esto ocurre durante los meses de Marzo y Abril cuando las precipitaciones toman valores que van de extremo bajo a alto.

La Figura 5.34 muestra las reglas obtenidas para la presa del embalse tomando como consecuente el pH. En este caso el comportamiento que presenta los meses y las temperaturas en función del pH es totalmente opuesto al que se observa en la cola del embalse. Se puede observar una relación inversa en el comportamiento del pH con los meses y la temperatura, es decir, conforme los meses y la temperatura van aumentando, el pH va disminuyendo su valor.

En la presa la relación entre el pH y la conductividad no queda tan definida como en la cola del embalse. La conductividad va disminuyendo conforme el pH aumenta desde valores extremo-bajos a medio-altos, en cambio, para valores altos y extremo-altos de pH no existe relación entre el pH y la conductividad.

La Figura 5.35 muestra las reglas obtenidas para la cola del embalse tomando como consecuente la lluvia. En general, se puede observar que cuando la lluvia presenta valores extremo-bajos el resto de parámetros estudiados pueden tomar cualquier valor de su universo de discurso, quedando algo más definidos los valores que pueden tomar la conductividad. Se puede ver como la lluvia mantiene una relación inversa con el pH y la conductividad, de modo que cuando la lluvia va alcanzando valores mayores, el pH y la conductividad van disminuyendo su valor. No se observa relación clara de la lluvia con los meses y la temperatura.

La Figura 5.36 muestra las reglas obtenidas para la presa del embalse tomando como consecuente la lluvia. Del mismo modo que ocurre en la cola del embalse, se puede observar que cuando la lluvia presenta valores extremo-bajos el resto de parámetros estudiados pueden tomar cualquier valor de su universo de discurso. De manera similar a las relaciones observadas en la cola, la lluvia mantiene una relación inversa con el pH y la conductividad, mientras que no se observa relación definida de la lluvia con los meses y la temperatura. Sin embargo, si se observa el modelo de

comportamiento de estos dos últimos parámetros mencionados, se puede ver como en la cola y en la presa el comportamiento que presentan es similar, aunque anómalo en ambos casos.

5.4.2.1. Conclusiones derivadas del estudio de los parámetros físico-químicos obtenidos de las sondas multiparamétricas instaladas en el punto cola y punto presa en el embalse Sancho durante todo el segundo año hidrológico

En el contexto descrito, la herramienta informática PreFuRGe utilizada en este estudio adquiere una dimensión de notable eficacia para el diagnóstico cualitativo de la situación, pudiendo ser aplicada también para el establecimiento de relaciones causa-efecto que, en contraste con los tratamientos estadísticos clásicos, mejora el trabajo considerablemente y hace que el conocimiento de los procesos involucrados sea más fácil. La aplicación de la lógica difusa y data mining para la caracterización de los procesos de AMD en el mismo sector y para la misma masa de datos, confirman y enriquecen los modelos operacionales previamente propuestos mediante estadística clásica.

Varios autores han informado de la ausencia de una correlación entre el pH y la conductividad en entornos de AMD (Dogan, 1999; Grande *et al.*, 2005a-b; Kwong y Lawrence, 1998; Liew y Sheppard, 2001; Younger, 1997; Younger *et al.*, 2002). Pero según Grande *et al.*, (2010b), el pH tiene una alta correlación, negativa con la conductividad. Este hecho se debe esperar si se admite que el proceso de oxidación de sulfuros genera, por un lado, sulfatos (que aumentan la conductividad), y al mismo tiempo, los iones hidrógeno (que acidifican el agua).

En la cola del embalse se puede ver como se confirma esta alta y negativa correlación entre el pH y la conductividad, siendo menos evidente en la presa. Este hecho puede ser explicado por los procesos de dilución asociados al tiempo de tránsito de contaminantes y al mayor volumen de agua en la zona de presa.

Como cabe esperar, mayores valores de pH se corresponden con menores valores de conductividad como consecuencia de la implicación directa en el valor que toma éste a medida que varían los sulfatos en ausencia de cloruros.

El comportamiento de las variables respecto a la lluvia es igual en presa que en cola con la salvedad de que en la presa los parámetros en estudio presentan una cantidad mayor de outliers como consecuencia de la distancia del canal emisor al punto de muestreo.

Resultan en todo caso, más evidentes las relaciones de dependencia de las variables en la cola que en la presa, así como las relaciones causa-efecto con las precipitaciones debido al diferente tiempo de residencia y tránsito de uno a otro punto de muestreo.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES FINALES

6. CONCLUSIONES FINALES

En este trabajo se han identificado y caracterizado diferentes embalses contaminados por drenaje ácido de mina en la Faja Pirítica Ibérica: Marismillas, Aguas Ácidas, Gossan, Andévalo-Cobica, Andévalo-Chorrito, Cueva de la Mora, Sancho, Olivargas, Agrio, Campanario, Chanza, Corumbel, del Pino, Grande, Lagunazo, La Joya, Silillos I, Silillos II, Puerto León, Dique I, Dique II, Garnacha y Herrerías. Las analíticas de las muestras de agua tomadas en estos embalses durante un año hidrológico, de forma bimensual, llevan a la conclusión de que todos ellos superan los límites establecidos por la Directiva 75/440/CEE de calidad requerida en las aguas superficiales destinadas a consumo público, siendo los que se encuentran más afectados, los ocho primeros.

Cada embalse presenta un rango de afección distinto, no quedando claro ningún patrón de comportamiento global, siendo en algunos casos el pH el que ejerce el control de la disolución de la mayoría de los metales y los sulfatos los que controlan el valor de la conductividad; sin embargo, en otros, es la precipitación la que se muestra como la principal variable que controla la disolución y/o redisolución de iones previamente precipitados, siendo menor la influencia del pH. Este diferente patrón individual de comportamiento es consecuencia de la coexistencia de paragénesis minerales muy diferentes a lo largo de la Faja Pirítica Ibérica, así como a la diversidad de tamaños y naturaleza de las cuencas vertientes y otros factores como superficie afectada, tipo, intensidad y duración del proceso de tratamiento.

Así mismo, se advierte en los diferentes embalses, un elevado contraste entre valores extremos de pH y concentración de metales y sulfatos, que puede deberse, por un lado, a la falta de homogeneidad en las condiciones del medio que provocarían diferencias en la presencia en disolución de los parámetros analizados y por consiguiente, la llegada de aportes contaminados por diferentes paragénesis minerales, con muy distintos niveles de afección. También puede ser considerada la proximidad al foco emisor de AMD, y por otro lado, el efecto tampón que se origina por la mezcla de aguas contaminadas con aguas limpias. A su llegada a los embalses, estas aguas ácidas experimentan un violento aumento de pH, lo que provoca la precipitación, en el propio embalse, de la mayor parte de la carga metálica transportada por el cauce minero, acumulándose en su lecho.

Mediante un estudio más pormenorizado de un embalse, en concreto el embalse El Sancho, y tras un muestreo semanal durante el segundo año hidrológico, tanto en el cauce que aporta sus aguas, como en la cola del mismo, se puede concluir que la

mayor parte de los parámetros determinados en las aguas recogidas en ambos puntos, se encuentran estrechamente relacionados entre sí, presentando, de un punto a otro, altos valores de correlación en un tiempo inferior a 15 días, debido a la pequeña distancia que existe entre ambos (unos 300 metros), lo que implica que aumentos o disminuciones de un parámetro en el cauce, tiene su consecuencia, prácticamente inmediata en la cola del embalse. Se ha encontrado como excepción a este comportamiento el caso del As, que presenta un retardo de 60 días, posiblemente como consecuencia de la rápida eliminación de este elemento cerca de su fuente por la adsorción en óxidos de hierro hidratados.

Por otra parte, para todos los parámetros determinados en el embalse El Sancho, se observa una mayor concentración de contaminantes en el punto cauce que el punto cola, siendo similar su evolución temporal. Durante el principio de la campaña se produce un pequeño ascenso del pH en ambos puntos, invirtiéndose este comportamiento a partir de la semana 11 y produciéndose una disminución brusca en la semana 16. Este ascenso inicial coincide con la reducción de la concentración de metales pesados, que comienza a aumentar a partir de la semana 11 y sufre un aumento brusco en la semana 16. Este comportamiento temporal es consecuencia de la descarga de las escombreras de minas de Tharsis, que al inicio de la campaña descargan el máximo volumen de agua, consecuencia de las primeras lluvias, y al avanzar la campaña va disminuyendo el caudal pero aumentando la concentración de metales pesados y la acidez que aportan.

Respecto al análisis de los resultados del muestreo semanal del mismo punto en la cola del embalse El Sancho y otro situado en la presa del mismo, se puede concluir que existe una mayor carga contaminante en la cola que en la presa, debido a la atenuación de esta entre ambos puntos, consecuencia de la precipitación de oxihidroxisulfatos de hierro debido a la elevación del pH, así como por los subsiguientes fenómenos de sorción y dilución. La presa del embalse, presenta una “inercia química” mucho mayor que la cola, debido al gran volumen de agua, lo que la hace, por tanto, menos sensible a las variaciones debidas a estímulos externos, y que conlleva a que la desviación estándar, el rango de oscilación o el coeficiente de variación de los parámetros analizados sea mayor en cola que en presa. Por otra parte, se concluye que el tiempo de tránsito de contaminantes entre la cola y la presa es inferior a 1 semana para la mayoría de los parámetros, aunque hay algunos para los que este periodo es superior, lo que dependerá de la capacidad de dilución del elemento.

Entre estos mismo puntos de muestreo del embalse El Sancho, y mediante los datos de pH y conductividad captados cada 30 minutos por las sondas multiparamétricas instaladas en la segunda campaña, se ponen en evidencia grandes diferencias en la físico-química del agua como consecuencia de la existencia de un proceso de dispersión y tránsito de contaminantes, con origen en la entrada de los mismos a través de la cola. De esta forma, si se atiende a los promedios anuales de conductividad, que muestran valores más altos en la cola que en la presa, éstos obedecen esencialmente a un mecanismo muy simple de disolución de las aguas de entrada ante el gran volumen de la cuenca receptora. Cada uno de los escenarios, queda caracterizado por las variables en estudio, con diferencias muy notables de uno a otro, que obedecen a los procesos que tienen lugar ya dentro del embalse, que funciona como medio receptor de aguas ácidas de mina y sujeto a los procesos de dilución, como consecuencia de la llegada de un caudal con variaciones composicionales en función de la época del año en que se considere. Al disponer de valores cada 30 minutos de pH y conductividad, se puede concretar que el tiempo de tránsito de la onda de dispersión es de 510 minutos (8,5 horas) desde cola hasta presa, referido a valor medio anual, y entendiendo que en función de las precipitaciones y/o potenciales alteraciones en la química de los aportes ácidos, se producirán variaciones. Para más abundar, se puede llegar a determinar el valor de la velocidad de forma sencilla: conocido el tiempo de llegada de la onda contaminante desde cola a presa (510 minutos), y conocida la distancia entre uno y otro punto de medida (14500 metros), basta con dividir ambos valores para obtener la velocidad que arroja un valor de 0,47 m/s.

A los datos anteriores obtenidos por las sondas multiparamétricas se han aplicado técnicas de fuzzy logic y data mining y, en concreto, la herramienta informática PreFuRGe, que adquiere una dimensión de notable eficacia para el diagnóstico cualitativo de la situación, pudiendo ser aplicada también para el establecimiento de relaciones causa-efecto que, en contraste con los tratamientos estadísticos clásicos, mejora el trabajo considerablemente y hace que el conocimiento de los procesos involucrados sea más fácil. La aplicación de la lógica borrosa y data mining para la caracterización de los procesos de AMD en el mismo sector y para la misma masa de datos, confirman y enriquecen los modelos operacionales previamente propuestos mediante estadística clásica. En la cola del embalse se puede confirmar la alta y negativa correlación entre el pH y la conductividad, siendo menos evidente en la presa. Este hecho puede ser explicado por los procesos de dilución asociados al tiempo de tránsito de contaminantes y al mayor volumen de agua en la zona de presa.

Como cabe esperar, mayores valores de pH se corresponden con menores valores de conductividad como consecuencia de la implicación directa en el valor que toma éste a medida que varían los sulfatos en ausencia de cloruros. El comportamiento de las variables respecto a la lluvia es igual en presa que en cola con la salvedad de que en la presa los parámetros en estudio presentan una cantidad mayor de outliers como consecuencia de la distancia del canal emisor al punto de muestreo. Resultan en todo caso, más evidentes las relaciones de dependencia de las variables en la cola que en la presa, así como las relaciones causa-efecto con las precipitaciones debido al diferente tiempo de residencia y tránsito de uno a otro punto de muestreo.

Estudiando, para este mismo embalse, la evolución de los parámetros típicos de la contaminación por AMD en profundidad, mediante un muestreo puntual, se concluye que sus aguas se encuentran estratificadas según tres intervalos de profundidad diferentes: epilimnion (0-16 m), metalimnion (16-20 m) e hipolimnion (20-28 m). Se observa, así mismo una agrupación de las muestras de agua en torno a estos niveles de profundidad: en el epilimnion se encuentran las más oxigenadas, con mayor conductividad, mayores concentraciones de sulfatos y pH más bajos; en el hipolimnion se hallan las muestras con menos oxigenación, menor conductividad, bajas concentraciones de sulfatos y pH más altos; en el metalimnion se sitúan las muestras de características intermedias. Además, se constata como en el hipolimnion tienen lugar los procesos de reducción de sulfatos, siendo las principales variables implicadas en el proceso, el oxígeno disuelto, temperatura, profundidad, pH, Al, Pb y Fe. Las condiciones altamente reductoras en el hipolimnion, causan aumento de pH y de Fe consecuencia de la reducción y redisolución de Fe(III), que puede presentarse en forma de schwertmannita. En el epilimnion tienen lugar los procesos de disolución, siendo el ion sulfato la principal variable responsable, lo que origina un aumento de la conductividad eléctrica y del total de sólidos disueltos.

Respecto al muestreo puntual llevado a cabo en el arroyo cuyas aguas proceden de mina Poderosa, se concluye que todos los parámetros relacionados con la contaminación por AMD, muestran una tendencia al aumento desde la salida del túnel de la mina hasta la confluencia con el río Odiel. Los sólidos disueltos y la conductividad son dos excepciones, mostrando una tendencia decreciente y una fuerte inflexión que describe un mínimo inmediatamente después del punto de descarga. El arroyo muestra una baja inercia hidroquímica, y en consecuencia, una alta vulnerabilidad a los estímulos externos.

Aplicando fuzzy logic a estos datos se desprende que, el Cd, Ni, Sb y TSD presentan un comportamiento similar en cuanto a las variaciones del pH y del potencial redox, aunque de forma inversa. Cuando el pH y el potencial redox aumentan sus valores, las concentraciones de dichos metales disminuyen. Por otro lado, el Fe(II), Fe(III) y los sulfatos, presentan un comportamiento completamente diferentes con respecto al potencial redox y al pH, aumentando sus concentraciones cuando el potencial redox disminuye, y cuando el pH aumenta, y manteniéndose en valores medios cuando el redox presenta valores extremo-bajos y cuando el pH presenta valores extremo-altos. Esto podría explicarse por el hecho de que los valores extremo-altos de pH se encuentran, en este caso, en los valores de pH en torno al cual el Fe(II) se oxida a Fe(III), y posteriormente precipita como oxihidroxisulfatos de hierro. Los valores tomados por el As se pueden explicar por la adsorción de As a las fases sólidas de Fe. Este proceso incluye la oxidación del Fe(II), seguido de la hidrólisis y de la precipitación del Fe(III) en forma de schwertmannita.

Por último, del muestreo de sedimentos llevado a cabo en el embalse de Marismillas, se concluye que las altas concentraciones obtenidas para los elementos analizados evidencian su afección por procesos AMD, debido al aporte de elementos en disolución y material particulado transportado por el río Tinto. Además de éstos, existe una tercera fuente de entrada procedente de las aguas residuales de la población de Nerva. El origen de estos elementos puede ser muy variado: por un lado aquellos que están relacionados directamente con la paragénesis mineral de los sulfuros (Fe y S) y con la roca encajante (Al y Mg), y aquellos que no lo están, pudiendo tener procedencia marina (Sr y Na), procedencia orgánica (P), etc. El factor de enriquecimiento ha permitido agrupar los elementos en: elementos empobrecidos, elementos enriquecidos y elementos altamente enriquecidos, correspondiéndose éstos dos últimos a los asociados a los depósitos de sulfuros polimetálicos. La distribución vertical de los elementos a lo largo de los perfiles de los sondeos, así como las diferencias de proximidad estadísticas entre ellos, reflejan las fluctuaciones de la antigua actividad minera en la cuenca del Tinto.

FINAL CONCLUSIONS

In this work, a total of 23 reservoirs contaminated by acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (IPB) have been identified: Marismillas, Aguas Ácidas, Gossan, Andévalo-Cobica, Andévalo-Chorrito, Cueva de la Mora, Sancho, Olivargas, Agrio, Campanario, Chanza, Corumbel, del Pino, Grande, Lagunazo, La Joya, Silillos I, Silillos II, Puerto León, Dique I, Dique II, Garnacha and Herrerías. The analytical results obtained for the water samples taken, bi-monthly, during a hydrological, show that all of them exceed the established limits by Directive 75/440/EEC for surface water intended for public consumption. The most affected are the first eight mentioned reservoirs.

Each reservoir has a different range of affection, not being clear a global behavior pattern. In some cases, the pH undoubtedly exerts control on dissolution of most metals and sulfates, which by its turn regulates the conductivity values. However, in other cases, the rainfall seems to be the key variable, controlling the dissolution and/or redissolution of ions previously precipitated, being smaller the influence of pH. This absence of a clear global pattern for all the reservoirs can be interpreted as a consequence of the coexistence of very different mineral paragenesis throughout the IPB, as well as the diversity of size and nature of the watersheds. Other factors, such as the affected area, type, intensity and duration of the mining processes also contribute to the development of individual hydrochemical patterns.

Nevertheless, it is noted a high contrast between extreme values of pH and concentration of metals and sulphates for the different reservoirs. This may be due, on one hand, to the lack of homogeneity in the environmental conditions that would cause differences in the presence in solution of the analyzed parameters and, therefore, the existence of contaminated inputs with very different levels of affection. Furthermore, it should be considered the proximity to the emitting source of AMD, and on the other hand, the buffer effect promoted by the mixture of contaminated water with clean water. On the arrival at the reservoirs, the acid waters undergo a violent increase in pH, which causes precipitation of most of the metal load carried by the mining channel, accumulating solid phases in the reservoir bed.

Detailed studies on a particular reservoir, specifically the Sancho reservoir, were carried out through a weekly sampling during the second hydrological year, both in the channel that brings its waters, and at a point called tail. A third point was considered at the dam of the reservoir.

The first study, conducted at the channel and at the tail's reservoir, allowed concluding that most parameters are closely related between the two points, presenting, from one point to another, high correlation values in a time lower than 15 days. This fact is due to the small distance between them (about 300 meters), which means that increase or decrease in the channel has a practically immediate consequence at the tail of the reservoir. The results indicated that As is an exception to this pattern, since it presents a delay of 60 days, possibly due to its rapid removal near the source, by adsorption on hydrated iron oxides. Moreover, all parameters determined in the Sancho reservoir have higher concentration of pollutants at the channel point than at the tail point, being similar its temporal evolution. At the beginning of the campaign, there is a small rise in pH, reversing this behavior after the 11th week, with an abrupt decrease in the 16th week. This initial rise coincides with the reduction of the concentration of metals, which begins to increase after the 11th week and suffers a sharp increase in 16th week. This temporal behavior is the result of the Acid mine drainage discharge from the wastes dumps of the Tharsis Mining Complex. So, at the beginning of the campaign these waste dumps discharged the maximum volume of water, in response to the first rains. With the advance of the season, there is a decrease in the water flow, but this is accompanied by an increase in the concentration of metals and acidity.

In what regards the relation observed between the tail of the Sancho reservoir and the point located at its dam, the results highlighted the existence of attenuation processes during the course of the water between the two points. In fact, it is possible to conclude that the pollution load is higher at the tail than at the dam. This attenuation was mainly related to the precipitation of iron oxyhydroxysulfates produced by the pH rise, and the subsequent sorption phenomena on their surfaces. The standard deviation, the range of oscillation and the variation coefficient at the tail are higher than at the dam. This can be explained by the concept of "chemical inertia", which is higher at the dam due to the large volume of water. Therefore, at this point the hydrochemistry will be less sensitive to variations due to external stimuli. Moreover, the results allowed to propose a transit time of contaminants between the tail point and the dam point of less than 1 week for most of the parameters, although there are some for which this time is higher, depending on the effect of dilution on the element.

An even more detailed study was performed between these two sampling points at the Sancho reservoir, but focused on the behavior of pH and conductivity. Data were captured every 30 minutes by using multiparameter probes installed in the second campaign. The results put in evidence large differences in the physical-chemical

parameters of the water as a result of the existence of a dispersion process and transit of contaminants originating from the same input through the tail.

In this way, considering the annual average of conductivity, there are higher values at the tail than at the dam, due to a very simple mechanism of dilution promoted by the entrance of the contaminants into the large volume of the reservoir that receives the acid waters. Each scenario is characterized by the variables under study, with large differences from one point to another, due to processes occurring inside the reservoir, which functions as a receptor of acid mine water and that is subject to dilution processes as a result of the arrival of a flow with compositional variations depending on the time of year. The availability of pH and conductivity values every 30 minutes, allowed determining the transit time of the dispersion wave, from tail to dam, as being 510 minutes (8.5 hours). Moreover, this led to determination of speed: considering the transit time between the tail point and the dam point (510 minutes), and known the distance between the two (14,500 meters), the 0.47 m/sec was obtained as the value of transit speed.

To these data obtained with the multiparameter probes, fuzzy logic and data mining techniques have been applied. In particular, the PreFuRGe computer tool was used, revealing a remarkable efficiency for the qualitative diagnosis of the situation, as well as for establishing cause-effect relationships. In contrast to the classical statistical treatments, this fuzzy tool improved considerably the work and makes the knowledge of the processes involved easier. The application of fuzzy logic and data mining to characterize the AMD processes confirms and enriches the operational models previously proposed by classical statistics. At the tail of the reservoir, the fuzzy treatment confirmed the high negative correlation between pH and conductivity, being less evident at the dam point. This fact can be explained by dilution processes associated to the transit time of pollutants and to the larger volume of water at the dam point. As expected, higher pH values correspond to lower conductivity values as a result of direct influence of sulfates on the conductivity in the absence of chlorides. The behavior of the variables regarding rainfall is similar at the tail and at the dam point, except that at the dam point, the parameters have higher amount of outliers due to the higher distance to the channel. In any case, the relations of dependence between variables, as well as the cause-effect relationships with the precipitation, are more evident at the tail than at the dam. This is due to the different time of residence and transit from one point to another.

A study of the evolution pattern with depth was also carried out in the Sancho reservoir. Typical parameters of pollution by AMD were analyzed, allowing concluding that the waters are stratified, defining three different depth intervals: Epilimnion (0-16 m), metalimnion (16-20 m) and hypolimnion (20-28 m). In the Epilimnion, there are the more oxygenated, with higher conductivity, and higher concentrations of sulfates and lower pH samples; in the hypolimnion, the samples have less oxygenation, lower conductivity, low concentrations of sulfates and higher pH; in the metalimnion are located the samples with intermediate characteristics. In addition, the results show the effects of sulfate reduction that is occurring in the hypolimnion, being dissolved oxygen, temperature, depth, pH, Al, Pb and Fe the main variables involved in the process. The highly reducing conditions in the hypolimnion, cause increased of pH and Fe, as a consequence of the reduction and redissolution of Fe (III) phases, such as schwertmannite. In the Epilimnion, dissolution processes take place, being the sulfate ion the key variable, causing an increase in electrical conductivity and total dissolved solids.

Another monitoring program was established for a particular stream carrying acid waters that would be indirectly affecting a water reservoir. The sampling program was carried out at the stream that collects waters from Poderosa mine. From the obtained results, it is possible to conclude that all parameters show an increasing trend from the tunnel exit of the mine to the confluence with the Odiel river. Dissolved solids and conductivity are two exceptions, showing a decreasing trend and a strong inflection that describes a minimum immediately after the discharge point. The hydrochemistry of this stream exhibits very low "inertia", and therefore a high vulnerability to external stimuli. Applying fuzzy logic to the data revealed that Cd, Ni, Sb and TSD exhibit similar behavior in terms of variations of pH and redox potential, although in reverse. When the pH and redox potential values increase, the concentrations of these metals are lower. Furthermore, Fe (II), Fe (III) and sulfates, exhibit a completely different behavior respect to the redox potential and pH, increasing their concentration when the redox potential decreases as the pH increases. This could be explained by the fact that the high pH values are, in this case, the pH values around which the Fe (II) is oxidized to Fe (III), and subsequently precipitates as iron oxihydroxysulfates. The behavior observed for As can be explained by the adsorption of this element onto the solid Fe rich solid phases. So, this process involves the oxidation of Fe (II), followed by hydrolysis and precipitation of Fe (III) as ochre products such as jarosite and schwertmannite.

Finally, a specific study focused on the sediments' geochemistry was performed in a clogged mining reservoir, the Marismillas reservoir. The following conclusions can be presented: the high concentrations obtained for the analyzed elements put in evidence the affection by AMD processes due to the contribution of elements in solution as well as of particulate matter carried by the Tinto river; besides, there is a third source of pollutants, related to the wastewater treatment plant from the population of Nerva. The origin of these elements can be very diverse, such as those directly related to the mineral assemblage of sulfides (Fe and S) and the host rock (Al and Mg), as well as those with marine origin (Sr and Na), organic origin (P), among others. The enrichment factor has allowed grouping the elements into: depleted elements, elements enriched and highly enriched elements. The two last groups include the elements directly associated with the polymetallic sulfide deposits. The spatial distribution of elements along vertical profiles is reflecting the fluctuations in the former mining activity on the Tinto river basin.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.M.A. (Agencia del Medio Ambiente) (1994). Informe Esturión. Preliminary report vol 1
- Abreu, M. M., Matias, M.J, Magalhães, M.C.F, Basto, M.J. (2008). Potencialidades do Pinus Pinaster e Cytisus multiflorus na fitoestabilização de escombrelas na mina de ouro de Santo António (Penedono). Revista de Ciências Agrárias. 14 p.
- Accornero, M., Marini, L., Ottonello, G., Vetuschi-Zuccolini, M., (2005). The fate of major constituents and chromium and others trace elements when acid waters from the derelict Libiola mine (Italy) are mixed with stream waters. Appl. Geochem., 20, 1368–1390.
- Achterberg, E.P., Herzl, V.M.C., Braungardt, C.B., Millward, G.E. (2003). Metal behaviour in an estuary polluted by acid mine drainage: the role of particulate matter. Environmental Pollution, 121, 283–292.
- Ackermann, F. (1980). A procedure for correcting grain-size effect in heavy metal analysis of estuarine and sediments. Environmental Technology Letters, 1, 518–527.
- Alcolea, A., Ayora, C., Bernet, O., Bolzicco, J., Carrera, J., Cortina, J. L., Coscera, G., de Pablo, J., Domènech, C., Galache, J., Gibert, O., Knudby, C., Mantecón, R., Manzano, M., Saaltink, M., Silgado, A. (2001). Barrera geoquímica. Boletín Geológico y Minero. Vol. Especial, 229-256, ISSN:0366-0176.
- Álvarez, M.T., Crespo, C., Mattiasson, B. (2007). Precipitation of Zn(II), Cu(II) and Pb(II) at bench-scale using biogenic hydrogen sulfide from the utilization of volatile fatty acids. Chemosphere, 66, 1677-1683.
- Amaral-Zettler, L.A., Zettler, E.R., Theroux, S.M., Palacios, C., Aguilera, A., Amils, R. (2011). Microbial community structure across the tree of life in the extreme Río Tinto. ISME Journal, 5 (1), 42-50.
- Archivo Histórico Minero de Fundación Río Tinto. Memorias anuales: 1954-1980.
- Aroba, J. (2003). Avances en la toma de decisiones en proyectos de desarrollo de software. PhD Thesis, University of Sevilla, Spain.
- Aroba, J., Grande, J.A., Andujar, J.M., de la Torre, M.L., Riquelme, J.C. (2007). Application of fuzzy logic and data mining techniques as tools for qualitative interpretation of acid mine drainage processes. Environmental Geology, 53, 135–145.

-
- Azcue, J.M. (1999) *Environmental Impacts of Mining Activities*. Springer. Germany.
- Banks, D., Younger, P.L., Arnesen R.T., Iversen, E.R., Banks, S.B. (1997). Mine-water chemistry: the good, the bad and the ugly. *Environmental Geology*, 32 (3), 157-174.
- Bartzas, G., Komnitsas, I. Paspaliaris (2006). Laboratory evaluation of Fe barriers to treat acidic leachates, *Minerals Engineering*, 19(5), 505-514, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2005.09.032>
- Basha, C.A., Bhadrinarayana, N.S., Anantharaman, N., Meera Sheriffa Begum, K.M. (2007). Heavy Metal Removal from Copper Smelting Effluent Using Electrochemical Cylindrical Flow Reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 152, 71–78.
- Bazdanis, G., Komnitsas, K., Sahinkaya, E., Zaharaki, D. (2011). Removal of heavy metals from leachates using permeable reactive barriers filled with reactive organic/inorganic mixtures, 3rd International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE 2011) & SECOTOX Conference, Skiathos, June 19-24, 2011, <http://www.cemepe3.prd.uth.gr/>
- Begon, M., Harper, J.L., Townsend, C.R. (1999). *Ecología. Individuos, poblaciones y comunidades*. Ed. Omega. Barcelona.
- Bezdek, J.C. (1981). *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithm*. Plenum Press, New York.
- Bisquerra R. (1989). *Conceptual introduction to Multivariate Analysis (Spanish)*, (808p.). Promociones y Publicaciones Universitarias, S.A. Barcelona, Spain.
- Blowes, D., W., Ptace, C., J., Jambor, J.L, Weisener, C.G. (2004). The geochemistry of acid mine drainage, En: *Treatise on geochemistry, Environmental geochemistry*, Vol, 9, Elsevier, Ed, Lollar, B, S., 149-204. *Boletín Geológico y Minero* 82, 239-268.
- Bolzicco, J., Carrera, J., Ayora, C., Cerón, J.C., Fernández, I. (2001). Comportamiento y evolución de una barrera geoquímica experimental en el río Agrío - Aznalcóllar - España. En: Ballester, A., Grima, J., López, J., Rodríguez, L. (eds.), *Investigación, Gestión y Recuperación de Acuíferos Contaminados*. Grafistaff, Madrid, 35-46.
- Borrego, J. (1992) *Sedimentología del estuario del Río Odiel, Huelva, S.O. España*. PhD Thesis. University of Sevilla.

Borrego, J., Carro, B., López-González, N., de la Rosa, J., Grande, J.A., Gómez, T. de la Torre, M.L. (2011). Effect of acid mine drainage on dissolved rare earth elements geochemistry along a fluvial estuarine systems: the Tinto-Odiel estuary (SW Spain). *Hydrology Research*, 43(3), 262-274. DOI: 10.216/nh.2011.012

Borrego, J., López-González, N., Carro, B., Lozano-Soria, O. (2004). Origin of the anomalies in Light and middle REE in sediments of an estuary affected by phosphogypsum wastes (south-western Spain). *Marine Pollution Bulletin*, 49, 1045–1053.

Borrego, J., Morales, J.A., de la Torre, M.L., Grande, J.A. (2002). Geochemical characteristics of heavy metal pollution in surface sediments of the Tinto and Odiel river estuary (southwestern Spain). *Environmental Geology*, 41, 785-796.

Borrego, J., Ruiz, F., González-Regalado, M.L., Pendón, J.G., Morales, J.A. (1999). The Holocene transgression into the estuarine basin of the Odiel River Mouth (Cadiz Gulf, SW Spain): lithology and faunal assemblages. *Quaternary Science Reviews*, 18, 769–788.

Bouchet, A., Meunier, A. Sardini, P. (2000) *Minéraux Argileux*. Ed Andra.

Braungardt, C.B., Achterberg, E.P., Elbaz-Poulichet, F., Morley, N. H. (2003). Metal geochemistry in a mine-polluted estuarine system in Spain. *Applied Geochemistry*, 18 (11), 1757-1771.

Braungardt, C.B., Achterberg, E.P., Nimmo, M. (1998). Behaviour of dissolved trace metals in the Rio Tinto/rio Odiel estuarine system. In: Morales, J.A., Borrego, J. (Eds.). *European land-Ocean interaction studies. Second Annual Scientific Conference: Abstracts* 51.

Brindley, G.W. (1980). Order-disorder in clay mineral structures. In G. W. Brindley e G. Brown, Eds., *Crystal Structures of Clay Minerals and their X-ray Identification*, Mineralogical Society, London. 125-195 p.

Brodie, G.A., Britt, C. R., Tomaszewski, T.M., Taylor, H.N. (1993). Anoxic limestone drains to enhance performance of aerobic acid drainage treatment wetlands: experiences of the Tennessee Valley Authority. En: Moshiri, G.A. (ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. CRC Press, Boca Raton, 129-138.

Bryan, G.W., Langston, W.J. (1992). Bioavailability, accumulation and effect of heavy metals in sediments with special reference to U.K. estuaries. *Environ. Pollut* 76, 89-131. USEPA. Dep. of Environmental Resources, Pennsylvania Report, 1-8 pp.

Cabrera, G., Pérez, R., Gómez, J.M., Ábalos, A., Cantero, D., (2006). Toxic effects of dissolved heavy metals on *Desulfovibrio vulgaris* and *Desulfovibrio* sp. strains. *Journal of Hazardous Materials*, 135 (1-3), 40-46.

Campaner, V.P., Luiz-Silva, W. (2009). Physico-chemical processes in acid mine drainage in coal mining South Brazil. *Quimica Nova* 32 (1), 146-152.

Cánovas C.R., Olías M., Sarmiento A.M., Nieto, J.M. (2005). Contenido de elementos traza en las aguas de los ríos Tinto y Odiel. VI Simposio del Agua en Andalucía, Tomo II, 1365-1376.

Cánovas, C., 2008. La calidad del agua de los ríos Tinto y Odiel: evolución temporal y factores condicionantes de la movilidad de los metales. Tesis doctoral. Universidad de Huelva.

Cánovas, C.R., Hubbard, C.G., Olías, M., Nieto, J.M., Black, S., Coleman, M.L. (2008). Hydrochemical variations and contaminant load in the Río Tinto (Spain) during flood events. *Journal of Hydrology*, 350 (1-2), 25-40.

Carro, B., López-González, N., Grande, J.A., Gómez, T., Valente, T. (2011). Impact of acid mine drainage on the hydrochemical characteristics of the Tinto-Odiel estuary (SW Spain). *Journal of Iberian Geology*, 37(1), 87- 96.

Casiot, C., Egal, M., Elbaz-Poulichet, F., Bruneel, O., Bancon-Montigny, C., Cordier, M.A., Gomez, E., Aliaume, C., (2009). Hydrological and geochemical control of metals and arsenic in a Mediterranean river contaminated by acid mine drainage (the Amous River, France), preliminary assessment of impacts on fish (*Leuciscus cephalus*). *Applied Geochemistry* 24 (5), 787-799.

Casiot, C., Leblanc, M., Bruneel, O., Personne, J.C., Koffi, K., Elbaz-Poulichet, F. (2003). Geochemical processes controlling the formation of As-rich waters within a tailings impoundment (Canoulès, France). *Aquat. Geochem.*, 9, 273–290.

Cerón, J.C, Grande, J.A., de la Torre, M.L., Borrego, J., Santisteban, M, Valente, T. (2013a). Hydrochemical characterization of an acid mine drainage-affected water

reservoir: The Sancho Dam (Huelva, SW Spain). *Hydrological Sciences Journal*, DOI:10.1080/02626667.2013.834341

Cerón, J.C, Grande, J.A., de la Torre, M.L., Santisteban, M, Valente, T. (2013b). Impact of AMD Processes on the Water Dams of the Iberian Pyrite Belt: Overall Hydrochemical Characterization (Huelva, SW Spain). *Water, Air and Soil Pollution*, 224(8),1-11. DOI 10.1007/s11270-013-1642-x

Chatterjee, M., Silva Filho, E.V., Sarkar, S.K., Sella, S.M., Bhattacharya, A., Satpathy, K.K., Prasad, M.V.R., Chakraborty, S., Bhattacharya, B.D. (2007). Distribution and possible source of trace elements in the sediment cores of a tropical macrotidal estuary and their ecotoxicological significance. *Environment International*, 33 (3), 346-356.

Chen, G., Chen, X., Yue, P.L. (2000). Electrocoagulation and Electroflotation of Restaurant Wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 126(9), 858-863.

Chester, R., 2000. *Marine Geochemistry*. Cambridge University Press, Cambridge, 506 pp.

Clark, M.J.R. (1992). Enhancement to the Pielou method for estimating the diversity of aquatic communities. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 11 (11), pp. 1559-1565.

Coester, S.E., Pulles, W., Heath, R.G.M., Cloete, T.E. (2006). Chemical characterisation of organic electron donors for sulfate reduction for potential use in acid mine drainage treatment. *Biodegradation*, 17, 67-77.

Commonwealth of Pennsylvania. (1994). *Water Quality Assessment in Western Pennsylvania Watershed*. Department of Environmental Protection. Pennsylvania. USA. Conference, Durango, CO.

Cortés, M.D., Varela, M., (1992). Variación espacio-temporal de parámetros físico químicos y biológicos en la ría de Huelva y área de influencia en el periodo 1987-1991. Instituto Español de Oceanografía, Informes Técnicos 138, 103 p.

Costa, M.C., Duarte, J.C. (2005). Bioremediation of acid mine drainage using acidic soil and organic wastes for promoting sulphate-reducing bacteria on a column reactor. *Water, Air, and Soil Pollution*, 165, 325-345.

Couceiro, M.A.A., Schettini, C.A.F. (2010). Assessment of the suspended sediment dynamics of the Araranguá river estuary (SC): Possible effects of acid drainage from the coal mining activity. *Geociencias*, 29(2), 251-266.

Cruzado, A., García, H.E., Velásquez, Z.R., Grimaldo, N.S., Bahamon, N., (1998). The Ria de Huelva (SW Spain). Hydrography and general characteristics. In: Morales JA, Borrego J (eds) *European Land-Ocean Interaction Studies. Second Annual Scientific Conference: Abstracts* 83.

Csuros, M., Csuros, C. (2002). *Environmental sampling and analysis of metals*. Lewis Publishers, Boca Raton, 372 p.

Custodio, E., Llamas, M.R. (1976). *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega, Barcelona, 2, 1-2450.

D.G.E.I.M. (1986). *La minería Andaluza*. Consejería de Economía y Fomento. Junta de Andalucía.2.

Davies, B.E. (1974) - Loss-on-ignition as an Estimate of Soil Organic Matter. *Soil Sci. Soc. Am. Proc*, v., 38, 347-353 p.

de la Torre, M.L., Grande, J.A., Jiménez, A., Borrego, J., Díaz Curiel, J.M. (2009). Time evolution of an AMD-affected river chemical makeup, *Water Resources Management*, 23(7), 1275-1289.

de la Torre M.L., Sanchez-Rodas, D., Grande, J.A., Gómez, T. (2010). Relationships between pH, colour and heavy metal concentrations in the Tinto and Odiel rivers (South West Spain). *Hydrology Research*, 41(5), 406-413.

de la Torre, M.L., Grande, J.A., Santisteban, M., Valente, T., Borrego, J., Salguero, F. (2013). Statistical Contrast Analysis of Hydrochemical Parameters Upstream of the Tidal Influence in Two AMD-Affected Rivers. *Mine Water and the Environment*. DOI 10.1007/s10230-013-0258-0.

de la torre, M.L., Grande, J.A. , Valente, T. , Santisteban, M. , Cerón, J.C. (2014a). Mixing and attenuation processes in an AMD-affected water reservoir. *Hydrology Research*. DOI: 10.2166/nh.2014.114

de la Torre, M.L., Grande, J.A., Valente, T., Santisteban, M., Cerón, J.C. (2014b). Hydrochemical changes in a reservoir that receives water contaminated by acid mine drainage. *Hydrology Research*, DOI:10.2166/nh.2014.114.

de la Torre, M.L., Grande, J.A., Valente, T., Perez, E., Santisteban, M., Aroba, J., Ramos, I., Salguero, F (2014c). A fuzzy qualitative model for the definition of redox and pH influence in the AMD of the Poderosa mine system (Iberian Pyrite Belt SW Spain). *Water Environmental Research*. In press

Delgado, J, Pérez-López, R., Galván, L., Nieto, J., Boski, T. (2012). Enrichment of rare earth elements as environmental tracers of contamination by acid mine drainage in salt marshes: A new perspective. *Marine Pollution Bulletin* 64, 1799–1808.

Dinelli, E., Lucchini, F., Fabbri, M., Cortecchi, G., (2001). Metal distribution and environmental problems related to sulfide oxidation in the Libiola copper mine area (Ligurian Apennines, Italy). *Journal of Geochemical. Exploration*. 74, 141–152.

Dogan, P.A. (1999). Characterization of mine waste for prediction of acid mine drainage. In: Azcue JM (ed) *Environmental impacts of mining activities*. Springer, Berlin.

Egal, M., Casiot, C., Morin, G., Elbaz-Poulichet, F., Cordier, M.A., Bruneel, O, (2010). An update insight into the natural attenuation of As concentrations in Reigous Creek (southern France). *Applied Geochemistry* 25 (12), 1949-1957. Elsevier, Ed, Lollar, B, S., 149-204.

Elbaz-Poulichet F, Dupuy, C, Cruzado, A, Velasquez, Z, Achterberg, P, Braungardt, C. (2000). Influence of sorption processes by iron oxides and algae fixation on arsenic and phosphate cycle in an acidic estuary (Tinto river, Spain). *Water Research*, 34(12), 3222-3230.

Elbaz-Poulichet, F., Braungardt, C., Achterberg, E., Morley, N., Cossa D., Beckers, J., Nomérange, P., Cruzado, A., Leblanc, M. (2001). Metal biogeochemistry In the Tinto-Odiel rivers (Southern Spain) and in the Gulf of Cadiz: a synthesis of results of TOROS project. *Continental Shelf Research*, 21(18-19), 1961-1973.

Elbaz-Poulichet, F., Morley, N.H., Cruzado, A., Velasquez, Z., Achterberg, E.P., Braungardt, C.B. (1999). Trace metal and nutrient distribution in an extremely low pH (2.5) river-estuarine system, the Ria of Huelva (south-west Spain). *The Science of The Total Environment*, 227, 73-83.

Elías, F., Castellvi, F. (1996). Agrometeorología. Mapa-Ediciones Mundi- Prensa, Madrid. 517p.

Espinosa M.A., Arteaga E.A., Zambrano R.M., Gonzalez L. (2010). Cinética de oxidación de la pirita, subproducto ácido del drenaje de la mina La Guitarra. Ingenierías, Vol XIII, nº 49.

Evangelous, V.P. (1998). Pyrite chemistry: The key for abatement of acid mine drainage. En: Geller, W., Klapper, H., Salomons, W. (eds.), Acidic mining lakes, Springer, 197-222.

Fallad, U.M., Uthurusamy, R. (1996) Data mining y KDD. Com. of the ACM, vol. 39, nº11.

Fernández, J.P.; Borrego, J.; Viñuela, I.; Grande, J.A.; de la Torre, M.L.; Valente, T.; Santisteban, M. (2013). Contribution of GPR and magnetic methods to the definition of the internal structure of a clogged mining dam in the Riotinto mine, South West Spain. Water Resources Forest, Oc. & Marine ecosystem, 735-743. DOI: 10.5596/sgem2013

Fernández-Rubio, R. (1986). Abandono de minas. Impacto Hidrológico. I.G.M.E. Madrid. 267 pp.

Fripp, J., Ziemkiewicz, P., Charkavorki, H. (2000). Acid mine drainage treatment. Ecosystem Management and Restoration Research Program (ERDC TN-EMRRP-SR-14), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, 7 pp.

Galán, E., Gómez-Ariza, J.L., González, I., Fernández-Caliani, J.C., Morales, E. y Giráldez, I. (2003) Heavy metal partitioning in river sediments severely polluted by acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt. Applied Geochemistry, 18, 409-421.

Gammons, C.H., Drury, W.J. Li, Y. (2000). Seasonal influences on heavy metal attenuation in an anaerobic treatment wetland, Butte, Montana. ICARD 2000, 1159-1168.

Gandullo, J.M. (1997). Implicaciones térmicas de la topografía: ensayo de un parámetro termotopográfico. Invest. Agr.: Sist. Recur. For., 6 (1-2), 7-15.

Gausson, H. (1952). La pluviometrie Ibérique. Revue Géographique des Pyrenées et du Sud-Ouest, 23 (3), 153-162.

Gibert, O., de Pablo, J., Cortina, J.L., Ayora, C. (2004). Chemical characterisation of natural organic substrates for biological mitigation of acid mine drainage. *Water Research*, 38, 4186- 4196.

Gonçalves, V. (1987). *Megalitismo e Metalurgia no Alto Algarve Oriental. Uma aproximação integrada*. Lisboa.

Grande, J.A., Borrego, J., Morales, J.A. (2000a). A study of heavy metal pollution in the Tinto-Odiel estuary in southwestern Spain using factor analysis. *Environmental Geology*, 39(10), 1095-1101.

Grande, J.A., Sáinz, A., de la Torre, M.L., López, N. (2000b). Caracterización de procesos AMD y ARD en la cuenca del río Odiel mediante aplicación de análisis univariante. *Ingeopres*, 88, 52-60.

Grande, J.A., Borrego, J., de la Torre, M.L., Sáinz, A. (2003a). Application of cluster analysis to the geochemistry zonation of the estuary waters in the Tinto and Odiel rivers (Huelva, Spain). *Environmental Geochemistry and Health*, 25, 233-246.

Grande, J.A., Borrego, J., Morales, J. A., de la Torre, M.L. (2003b) A description of how metal pollution occurs in the Tinto–Odiel rias (Huelva-Spain) through the application of cluster analysis. *Marine Pollution Bulletin*, 46 (4), 475-480.

Grande, J.A., Andújar, J.M., Aroba, J., de la Torre, M.L., Beltrán, R, (2005a). Precipitation, pH and metal load in AMD river basins: An application of fuzzy clustering algorithms to the process characterization. *Journal of Environmental Monitoring*, 7 (4), 325-334.

Grande, J.A., Beltrán, R., Sáinz, A., Santos, J.C., de la Torre, M.L., Borrego, J, (2005b). Acid mine drainage and acid rock drainage processes in the environment of Herrerías Mine (Iberian Pyrite Belt, Huelva-Spain) and impact on the Andevalo Dam. *Environmental Geology*, 47 (2), 185-196.

Grande, J.A., Andújar, J.M., Aroba, J., de la Torre, M.L, (2010a). Presence of As in the fluvial network due to AMD processes in the Riotinto mining area (SW Spain): A fuzzy logic qualitative model. *Journal of Hazardous Materials*, 176 (1-3), 395-401.

Grande, J.A. Andújar, J.M., Aroba, J., Beltrán, R., de la Torre, M.L., Cerón, J.C., Gómez, T., (2010b). Fuzzy modelling of the spatial evolution of the chemistry in the Tinto river (SW Spain). *Water Resources Management*, 24, 3219-3235.

Grande, J.A., de la Torre, M.L., Cerón, J.C., Beltrán, R., Gómez, T., (2010c). Overall hydrochemical characterization of the Iberian Pyrite Belt. Main acid mine drainage generating sources (Huelva, SW Spain) *Journal of Hydrology*, 390, 123-130.

Grande, J.A., Jiménez, A., Romero, S., de la Torre, M.L., Gómez, T. (2010d). Quantification of heavy metals from AMD discharged into a public water supply dam in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain) using centered moving average. *Water, Air and Soil Pollution*, 212, 299-307.

Grande, J.A., Jiménez, A., Borrego, J., de la Torre, M.L., Gómez, T. (2010e). Relationships between conductivity and pH in channels exposed to acid mine drainage processes: study of a large mass of data using classical statistics. *Water Resources Management*, 24, 4579-4587.

Grande, J.A. (2011) Impact of AMD processes on the public water supply: Hydrochemical variations and application of a classification model to a river in the Iberian Pyritic Belt. S.W. Spain. *Hydrology Research*, 42(6), 472-478.

Grande, J.A., Aroba, J., Andujar, J.M., Gómez, T., de la Torre, M.L., Borrego, J., Romero, S., Barranco, C., Santisteban, M. (2011a). Tinto versus Odiel: two AMD polluted rivers and an unresolved issue. An artificial intelligence approach. *Water Resources Management*, 25, 3575- 3594.

Grande, J.A., de la Torre, M.L., Cerón, J.C., Sánchez-Rodas, D., Beltrán, R. (2011b). Arsenic speciation in the Riotinto mining area (SW Spain) during a hydrological year. *Water Practice and Technology*. Doi:10.2166/WPT.2011.011.

Grande, J.A., de la Torre, M.L., Valente, T., Cerón, J.C., Santisteban, M., Fernández, J.P, Pérez-Ostale, E. (2012). Caracterización hidroquímica de un efluente minero en la Faja Pirítica Ibérica. SIAGA2012, Instituto Geológico y minero de España, pp,439, Cádiz, 1-3 Octubre.

Grande, J.A., de la Torre, M. L., Andújar, J., Valente, T., Santisteban, M. (2013a). Definition of a clean energy system for decontamination of acid mine waters and recovering their metal load. *Mineralogical Magazine*, DOI:10.1180/minmag.2013.077.5.7.

Grande, J. A., Santisteban, M., de la Torre, M. L., Valente, T., Pérez- Ostalé, E. (2013b). Characterisation of AMD Pollution in the Reservoirs of the Iberian Pyrite Belt. *Mine Water and the Environment*, 32,321-330. DOI 10.1007/s10230-013-0236-6

Grande, J.A., de la Torre, M.L., Valente, T., Fernández, J.P., Borrego, J., Santisteban, M., Cerón, J.C., Sánchez-Rodas, D. (2014a). Stratification of Metal and Sulphate Loads in Acid Mine Drainage Receiving Water Dams Variables Regionalization by Cluster Analysis. *Water Environment Research*. In press.

Grande, J. A., de la Torre, M. L., Santisteban, M., Valente, T., Fernandez, J.P., Pérez-Ostalé, E. (2014b). Spatial evolution of an AMD stream in the Iberian Pyrite Belt: process characterization and control factors on the hydrochemistry. *Water Environment Research*. In press

Gray, N.F. (1997) Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Environmental Geology*, 30, 62-71.

Gray, N.F., Delaney, E. (2010). Measuring community response of benthic macroinvertebrates in an erosional river impacted by acid mine drainage by use of a simple model. *Ecological Indicators*, 10 (3), 668-675.

Guevara, A. (2012). Utilización de los humedales construidos en el tratamiento del drenaje ácido de mina. Universidad Industrial de Santander.

Gunn, J., Sarrazin-Delay, C., Wesolek, B., Stasko, A., Szkokan-Emilson, E. (2010). Delayed recovery of benthic macroinvertebrate communities in Junction Creek, Sudbury, Ontario, after the diversion of acid mine drainage. *Human and Ecological Risk Assessment*, 16 (4), 901-912.

Gusek, J.J. (2002). Sulfate-Reducing Bioreactor Design and Operating Issues: Is This the Passive Treatment Technology for Your Mine Drainage?. *Nation Association of Abandoned Mine Land Programs*, Park City, Utah, September 15-18.

Gustafsson, H.E., Lundgren, T., Lindvall, M., Lindahl, L-E., Eriksson, N., Jönsson, H., Broman, P.G., Göransson, T. (1999). The Swedish Acid Mine Drainage Experience: Research, Development, and Practice. En: Azcue, J.M., (ed.). *Environmental impacts of mining activities. Emphasis on mitigation and remedial measures*. Springer Verlag, Berlin., 203 - 228.

Hafs, A.W., Horn, C.D., Mazik, P.M., Hartman, K,J, (2010). Influences of acid mine drainage and thermal enrichment on stream fish reproduction and larval survival. *Northeastern Naturalist*, 17 (4), 575-592.

Hao, C., Wang, L., Gao, Y., Zhang, L., Dong, H, (2010). Microbial diversity in acid mine drainage of Xiang Mountain sulfide mine, Anhui Province, China. *Extremophiles*, 14 (5), 465-474.

Hedin, R. (1997). Passive mine water treatment en the Eastern United States. CIWEM National Conference, Minewater treatment using wetlands, Newcastle, 1, 1-15.

Hedin, R. S., Nairn, R.W. (1993). Contaminant removal capabilities of wetlandsbconstructedbto treat coal mine drainage. In: Moshiri, G.A. (ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. CRC Press, Boca Raton, 187-195.

Hedin, R.S., Watzlaf, G.R., Nairn, R.W. (1994). Passive treatment of acid mine drainage with limestone. *Journal of Environmental Quality*, 23 (6), 1338-1345.

Heijs S.K., Van Gernerden H., 2000 Microbiological and environmental variables involved in the sulfide buffering capacity along eutrophication gradient in a coastal lagoon (Bassin d'Arcachon, France). *Hydrobiologia*, 437, 121–31.

Hinton, J.J. and Veiga, M.M. (2001). Mitigation of Mercury Pollution in an Artisanal Gold Mining Community, Cachoeira do Piriá, Brazil. *Proc. 6th International Conference on Mercury as a Global Pollutant*, p. 197. Minamata, Oct 15-19, 2001.

Hinton,J.J. and Veiga,M.M. (2000). Earthworms as Bioindicators of Mercury Pollution. *Proc. International Conference on Heavy Metals in the Environment*. 4p. CD ROM. Ann Arbor, Michigan, Aug 6-10, 2000.

Holsheimer, M., Siebes, A. (1994) Data mining: the search for knowledge in databases. Report CS-R9406, CWI, Amsterdam.

Hubbard, C.G., Black, S., Coleman, M.L, (2009). Aqueous geochemistry and oxygen isotope compositions of acid mine drainage from the Río Tinto, SW Spain, highlight inconsistencies in current models. *Chemical Geology*, 265 (3-4), 321-334,.

Hudson-Edwards, K.A., Schell, C., Macklin, M.G. (1999). Mineralogy and geochemistry of alluvium contaminated by metal mining in the Riotinto area, southwest Spain. *Applied Geochemistry*, 14, 1015–30.

Hwang, H.M., Green, P., Young, T. (2009). Historical trends of trace metals in a sediment core from a contaminated tidal salt marsh in San Francisco Bay. *Environmental Geochemistry and Health*, 31 (4), 421-430.

IGME (1982). Mapa Geológico de España E, 1:50000 n° 959 Calañas, Servicio Instituto Geológico y Minero de España, pp, 201-205.

Jambor, J.L. (1994). Mineralogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products. En: Jambor, J.L., Blowes, D.W. (eds.), Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-wastes. Short Course, 22. Mineralogical Association of Canada, 59-102.

Jambor, J.L., Dutrizac, J.E., Groat, L.A., Raudsepp, M. (2002). Static tests of neutralization potentials of silicate and aluminosilicate minerals. Environmental Geology, 43, 1-17.

Jarvis A.P., Younger P.L. (2000). Broadening the scope of mine water environmental impact assessment: a UK perspective. Environmental Impact Assessment Review, 20, 85-96.

Jiménez, A., Aroba, J., de la Torre, M.L., Andújar, J.M., Grande, J.A, (2009). Model of behaviour of conductivity versus pH in acid mine drainage water, based on fuzzy logic and data mining techniques. Journal of Hydroinformatics, 11 (2), 147-153.

Johnson, D.B., Hallberg, K.B. (2005). Acid mine drainage remediation options: a review. Science of the Total Environment, 338, 3-14.

Kendall, D.G. (1975): Analysis Multivariant. Griffin & Co. Bristol.

Kepler, D., McCleary, E. (1994). Successive alkalinity producing systems (SAPS) for the treatment of acidic mine drainage. International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, Pittsburgh, April, 195-204.

Knöller, K., Fauville, A., Mayer, B., Strauch, G., Friese, K., Veizer, J., 2004. Sulfur cycling in an acid mining lake and its vicinity in Lusatia, Germany. Chemical Geology. 204, 303–323.

Komnitsas, K., Bazdanis, G., Bartzas, G., Zaharaki, D., Sahinkaya, E. (2012). Prevention of groundwater contamination in waste disposal sites using composite reactive barriers, Protection and Restoration of the Environment XI, 3-6 July 2012, Thessaloniki, <http://www.pre11.org/>

Komnitsas, K., Bazdanis, G., Sahinkaya, E., Bartzas, G., Zaharaki, D. (2013). Removal of heavy metals from leachates using permeable reactive barriers filled with reactive

organic/inorganic mixtures, *Desalination and Water Treatment*, 51:3052-3059, doi:10.1080/19443994.2012.748456

Kwong, Y.T.J., Lawrence, J.R. (1998). Acid generation and metal immobilization in the vicinity of a natural acid lake in Central Yukon Territory, Canada. In: Geller W, Klapper H, Salomons W (eds) *Acid mining lakes*. Springer, Canada, 416 p.

Lanesky, D.E., Logan, B.W., Brown, R.G., Hine, A.C. (1979). A new approach to portable vibracoring underwater and on land. *Journal of Sedimentary Petrology*, 39, 655–657

Leblanc M, Morales JM, Borrego J, Elbaz-Poulichet F (2000). 4.500 year-old mining pollution in Southwestern Spain: Long-term implications for modern mining pollution. *Economic Geology*, 95, 655-662.

Leduc D., Leduc L.G., Ferroni G.D. (2002). Quantification of bacterial populations indigenous to acidin drainage streams. *Water, Air, and Soil Pollution*, 135, 1-21.

Letterman R.D., Mitsch W.J. (1978) Impact of mine drainage on a mountain stream in Pennsylvania. *Environmental Pollution*, 17, 53-73.

Liew, D., Sheppard, J. 2001 Use of conductivity to monitor the treatment of acid mine drainage ysulphate reducing bacteria. *Water Resour*, 35(8), 2081–2086.

Lima, A. S. (2004) *Hidrogeologia de Regiões Graníticas (Braga – NW Portugal)*, Universidade do Minho, Tese de Mestrado, 202 p.

Lobo, A., Valente, T., de la Torre, M.L., Grande, J.A., Santisteban, M., Salmerón, I., Sánchez Requena, J.(2014). Spatial behavior of acid mine drainage in a peculiar stream: physical-chemical evolution from the source until the temporarily receptor in the Iberian Pyrite Belt. *Proceedings of the Energy and Environment Knowledge Week 2014 Toledo, Spain 30th-31st – October* ISBN: 978-84-697-1162-0.

López Zafra, F., Sanz Santacruz, M. (2001). *Desarrollo sostenible: presa del Andévalo Huelva. Cauce 2000*. COICCP Madrid. 46-53.

López-Archilla, A.I., Amils, R. (1999): A comparative ecological study of two acidic rivers in southwestern Spain. *Microbial Ecol*, 38, 146-156.

López-González, N., Borrego, J., Morales, J.A., Carro, B., Lozano-Soria, O. (2006). Metal fractionation in oxic sediments of an estuary affected by acid mine drainage (south-western Spain). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68 (1), 297-304.

López-Pamo, E., Aduvire, O., Baretino, D. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*, 113 (1), 3-21.

López-Pamo, E., Sánchez España, J., Díez Ercilla, M., Santofimia Pastor, E., Réyes Andrés, J., 2009. Cortas mineras inundadas de la Faja Pirítica Ibérica: inventario e hidroquímica. Instituto geológico y Minero de España. Serie: medio Ambiente. Número, 13.

Loredo, J., Álvarez, R., Ordoñez, A. (2005). Release of toxic metals and metalloids from Los Ruedos mercury mine (Asturias, Spain). *Science of the Total Environment*, 340, 247– 260

Loredo, J., Petit-Domínguez, M.D., Ordóñez, A., Galán, M.P., Fernández-Martínez, R., Álvarez, R., Rucandio, M.I. (2010). Surface water monitoring in the mercury mining district of Asturias (Spain). *Journal of Hazardous Materials*, 176(1-3), 323-332.

Loring, D.H. (1991). Normalization of heavy-metal data from estuarine and coastal sediments. *ICES Journal of Marine Science*, 48, 101–115.

Lowson, R.T. (1982). Aqueous oxidation of pyrite by molecular oxygen. *Chemical Reviews*, 82, 461-497.

Macias, F. (2012). Estudio mineralógico y geoquímico de la optimización de un sistema de tratamiento pasivo de drenaje ácido de mina con alta carga metálica. Tesis Doctoral, Universidad de Huelva, ISBN: 978-84-15633-81-5.

Manuel Ferreras-Romero, Francisco Jesús Cano-Villegas y Juan César Salamanca-Ocaña. (2003). Valoración de la cuenca del río Guadiana (sur de España), afectada por un vertido minero, en base a su odonofauna. *Limnetica*, 22(3-4), 53-62

Manzano, M., Ayora, C., Carrera, J., Custodio, E., Mediavilla, C. (2008). Estudio de la afección del Vertido de Aznalcóllar a las aguas subterráneas. En: *La restauración ecológica del río Guadiana y el Proyecto del Corredor Verde*. Junta de Andalucía. Capítulo 6, 121- 124.

Martín , M., Palancar, M., Mantecón, R., Vives, R., del Olmo, P., Barrera, F.B., Mediavilla, C., López, J.A.B (2001). Marco geográfico, geológico e hidrológico regional de la cuenca del Guadiamar. *Boletín geológico y minero*, 112, 13-34.

Meech, J.A and Veiga,M.M. (1998). An Adaptive Fuzzy Model to Evaluate Technological Evolution. *Minerals Engineering*, 11(7), 597-604.

Meech,J.A. and Veiga,M.M. (1997a). Predicting the Impact of Mercury Pollution with a Fuzzy Expert System. *Proc. 97-IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, v. 2, p. 1056-1061, Orlando, Florida, Oct. 12-15.

Meech,J.A. and Veiga,M.M. (1997b). Artificial Intelligence for Artisanal Miners. *IPMM'97, Australasia-Pacific Forum on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials*, Gold Coast, Australia, v.1, p. 268-275, Jul 14-17, 1997.

Mollah, M., Morkovsky, P., Gomes, J., Kesmez, M., Parga, J., Cocke, D.L. (2004). Fundamentals, Present and Future Perspectives of Electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, B114, 199–210, DCN 03300.

Monna, F., Petit, C., Guillaument, J.P., Jouffroy-Bapicot, I., Blanchot, C., Dominio, J., Losno, R., Richard, H., Lévêque, J., Chateau, C., 2004. History and environmental impacts of mining activity in Celtic Aeduan Territory recorded in a Peat Bog (Morvan, France). *Environmental Science and Technology*, 38 (3), 665–673.

Monterroso C., Macias F. (1998). Drainage waters affected by pyrite oxidation in coal mine in Galicia (NW Spain): Composition and mineral stability. *The Science of the Total Environment*, 216, 121-132.

Moreno, C, (1987). Las facies Culm del anticlinorio de la Puebla de Guzmán (Huelva, España). Tesis Doctoral, Universidad de Granada, pp, 375.

Moreno, C, (1993): Postvolcanic paleozoic of the Iberian Pyrite Belt: An example of basin morphologic control on sediment distribution in a turbidite basin. *Journal Sedimentary Petrology*, 63, 1118-1128.

Moreno, C.; González, F. (2004). Estratigrafía de la Zona Surportuguesa. En: *Geología de España* (Vera, J.A. eds). SGE-IGME, Madrid, pp.201-205.

Moreno, C., González, F., Sáez, R., Sierra, S, (2003). Inicio del vulcanismo en el sector de Calañas (Faja Pirítica Ibérica). Caracterización y datación. *Geogaceta* 33, 59-62.

Morillo, J., Usero, J., Rojas, R. (2008). Fractionation of metals and As in sediments from a biosphere reserve (Odiel salt marshes) affected by acidic mine drainage. *Environmental Monitoring and Assessment*, 139 (1-3), 329-337.

Motyka, J., Postawa, A., 2000. Influence of contaminated Vistula River water on the groundwater entering the Zakrzówek limestone quarry, Cracow region, Poland. *Environ. Geol.*, 39, 398–404.

Mukhopadhyay, B., Bastias, L., Mukhopadhyay, A. (2007). Limestone drain design parameters for acid rock drainage mitigation. *Mine Water and the Environment*, 26, 29-45.

Nebel, B.J., Wrigth, R.T. (1999). *Ciencias ambientales. Ecología y desarrollo sostenible*. Prentice may. México.

Neculita, C.M., Zagury, G.J., Brussiè, B. (2007). Passive treatment of acid mine drainage in bioreactors using sulfate-reducing bacteria: critical review and research needs. *Journal of Environmental Quality*, 36, 1-16.

Nelson CH, Lamothe PJ (1993) Heavy metals anomalies in the Tinto and Odiel River and Estuary System, Spain. *Estuaries*, 16, 496–511.

Nieto J.M., Sarmiento A, Olías M., Cánovas C., Riba I., Kalman J, Delvalls T.A. (2007). Acid mine drainage pollution in the Tinto and Odiel rivers (Iberian Pyrite Belt, SW Spain) and bioavailability of the transported metals to the Huelva estuary. *Environmental International*. 33, 445-455.

Nocete, F., Linares, J.A. (1999). Las primeras sociedades mineras en Huelva. Alosno. *Historia de la Provincia de Huelva* . Huelva, Editorial Mediterráneo, 49-64.

Nocete, F., Sáez, R., Nieto, J. M., Lizcano, R., Bayona, M. R., Álex, E. and Inácio, N. (2005a). Nouvelles perspectives pour les analyses historiques de la première exploitation minière et de la première métallurgie dans la Péninsule Ibérique: La production du cuivre à Cabezo Juré (2900-2200 BC) *CU*, 4 , 24-28.

Nordstrom, D.K., Alpers, C.N. (1999). Geochemistry of acid mine waters. In: Plumlee, G.S. and Logson, M.J. (eds.). The environmental geochemistry of mineral deposits. Reviews in Economic Geology, vol. 6A, Society of Economic Geologists, Inc, Littleton, 133-160.

Nriagu, J.O., Allan, R.J. (1993). Heavy metals in the Environment, IX, Vol. 1. CEP Consultants, Edinburgh (UK).

Ochieng, G.M., Seanego, E.S., Nkwonta, O.I, (2010). Impacts of mining on water resources in South Africa: A review, Scientific Research and Essays, 5 (22), 3351-3357.

Olías, M., Cánovas C.R., Nieto, J.M., Sarmiento, A.M. (2006) Evaluation of the dissolved contaminant load transported by the Tinto and Odiel rivers (South West Spain). Applied Geochemistry, 21, 1733-1749.

Olías, M., Nieto, J.M., Sarmiento, A.M., Cánovas, C.R., Galvan, L. (2011). Water Quality in the Future Alcolea Reservoir (Odiel River, SW Spain): A Clear Example of the Inappropriate Management of Water Resources in Spain. Water Resources Management, 25 (1), 201-215.

Olías, M., Nieto, J.M., Sarmiento, A.M., Cerón, J.C. y Cánovas, C.R. (2004). Seasonal water quality variations in a river affected by acid mine drainage: the Odiel River (South West Spain). Science of the Total Environment 333, 267-281.

Oliveira, J.T. (1990). South Portuguese Zone: Introduction. Stratigraphy and synsedimentary tectonism. In: PreMesozoic Geology of Iberia. Dallmeyer, R.D. and Martínez García, E. (eds.). Springer Verlag. Heidelberg, 333-347.

Oliveira, J.T., Wagner-Gentis, C.H.T. (1983). The Mértola and Mira formations boundary between Dugueno and Almada de Ouro, Marine Carboniferous of South Portugal. In: Lemos de Sousa (ed.). Contributions to the Carboniferous geology and paleontology of the Iberian Peninsula. University of Porto, 1-39.

Ordóñez, A. (1999). Sistemas de Tratamiento pasivo para aguas ácidas de mina. Experiencias de laboratorio, Diseño y ejecución. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, ISBN: 978-84-690-7854-9.

Ortiz M. 2003. Aproximación a la minería y metalurgia de minas de Riotinto desde la antigüedad al siglo XIX. PhD Thesis. Spain

Palau, A. (2002). La sedimentación en embalses. Medidas preventivas y correctoras. I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente, 847-856.

Parker, G. y Robertson, A. (1999). Acid Drainage. A critical review of acid generation from sulfide oxidation: Processes, treatment and control. Australian Minerals & Energy Environment Foundation Occasional Paper no. 11, 227 pp.

Pérez-Ostale (2014). Caracterización ambiental de estructuras mineras en la Faja Pirítica Ibérica como soporte metodológico de gestión territorial. PhD Thesis, University of Huelva.

Pérez-Ostalé, E., Grande, J.A., de la Torre, M.L., Valente, T., Cerón, J.C. and Santisteban, M. (2013). Inventory of mining and quantification of affected areas in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). Methodological contribution to environmental management. Water Resources Forest, Oc. & Marine Ecosystem, ISSN: 1314-2704, 1, 613-621.

Pinedo, Y. (1963). Piritas de Huelva. Summa, Madrid.

Prasad, D., Wai, M., Berube, P., Henry, J.G. (1999). Evaluating substrates in the biological treatment of acid mine drainage. Environmental Technology, 20, 449-458.

Quesada, C. (1996) Estructura del sector español de la Faja Pirítica: implicaciones para la exploración de yacimientos. Boletín Geológico y Minero 107, 65–78.

Regenspurg, S., Peiffer, S. (2005) Arsenate and chromate incorporation in schwertmannite. Applied Geochemistry., 20, 1226–1239.

Resongles, E., Casiot C., Freydier, R, Dezileau, L, Viers, J, Elbaz-Poulichet, F. (2014). Persisting impact of historical mining activity to metal (Pb, Zn, Cd, Tl, Hg) and metalloid (As, Sb) enrichment in sediments of the Gardon River, Southern France. Science of the Total Environment, Elsevier, 481,509-521.

Rickard, D., Morse, J.W., 2005. Acid volatile sulfide (AVS). Marine Chemistry, 97:141–97.

Ridgway, J., Shimmield, G. (2002). Estuaries as repositories of historical contamination and their impact on shelf seas. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 55, 903–928.

Roberts, S.A. and Veiga, M.M. (2001). Using Fuzzy Logic as a Decision Aid in the Identification of Indicators of Sustainability. Proc. of IPMM 2001 - 3rd International

Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials, Vancouver, BC, Jul. 29-Aug. 3, 2001.

Rodríguez, J., Stopic, S., Krause, G., Friedrich, B. (2007). Feasibility Assessment of Electrocoagulation Towards a New Sustainable Wastewater Treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 14 (7), 477–482.

Romero, F.M., Núñez, L., Gutiérrez, M.E., Armienta, M.A., Cenicerros-Gómez, A.E, (2011). Evaluation of the potential of indigenous calcareous shale for neutralization and removal of arsenic and heavy metals from acid mine drainage in the Taxco mining area, Mexico. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 60 (2), 191-203

Ruiz, F., Borrego, J., González-Regalado, M.L., López-González, N., Carro, B., Abad, M, (2009). Interaction between sedimentary processes, historical pollution and microfauna in the Tinto estuary (SW Spain). *Environmental Geology*, 58 (4), 779-783.

Ruiz, F., González-Regalado, M.L., Borrego, J., Morales, J.A., Pendón, J.G., Muñoz, J.M., (1998). Stratigraphic sequence, elemental concentrations and heavy metal pollution in Holocene sediments from the Tinto-Odiel estuary, south-western Spain. *Environmental Geology*, 34, 270–278.

Sáez R., Nocete F., Nieto J, M., Capitán M, A, y Rovira S, (2003). The extractive metallurgy of copper from Cabezo Juré, Huelva, Spain: Chemical and mineralogical study of slags dates to the third millenium B,C. *The Canadian Mineralogist*, 41, 627-638.

Sáez, R. (2010). *La Faja Pirítica Ibérica, Una perspectiva geológica, arqueológica y ambiental*. PhD Thesis, University of Huelva.

Sáez, R., Moreno, C., González, F. (2005). Los diques clásticos de Filón Norte (Tharsis). Interpretación en relación con la crisis finidevónica de la cuenca de la Faja Pirítica Ibérica, *Geogaceta* 37, 59-62.

Sáinz, A, (1999). *Estudio de la Contaminación Química de Origen Minero en El Río Odiel*, PhD Thesis, University of Huelva.

Sáinz, A, Grande, J,A., de la Torre, M,L, (2000a). El Tinto y el Odiel: dos ríos para una reflexión. *Tecnología del agua*, 207, 28-35.

Sáinz, A., Grande, J.A., de la Torre, M.L., López, N. (2000b). Influencia de la fracción granulométrica de corte en los contenidos de metales pesados de los sedimentos del curso principal del río Odiel. *Hidropres*, 26, 44-49.

Sáinz, A., Grande, J.A., de la Torre, M.L., López, N. (2000c). Análisis de la contaminación por AMD en la cuenca del río Odiel. *Residuos*, 57, 91-98.

Sáinz, A., Grande, J.A., de la Torre, M.L., Sánchez-Rodas, D. (2002). Characterisation of sequential leachate discharges of mining waste rock dumps in the Tinto and Odiel rivers. *Journal of Environmental Management*, 64 (4), 345-353.

Sáinz, A., Grande, J.A., de la Torre, M.L. (2003). Odiel river, acid mine drainage and current characterisation by means of univariate analysis. *Environment International*. 29, 51-59.

Sáinz A., Grande, J.A., de la Torre, M.L. (2004) Characterization of heavy metal discharge into the ria of Huelva. *Environment International*, 30, 557-566.

Sainz, A., Grande, J.A., de la Torre, M.L. (2005) Application of a systemic approach to the study of pollution of the Tinto and Odiel rivers (Spain) *Environmental Monitoring and Assessment*, 102, 435-445.

Salmerón, I., Valente, T., Grande, J.A., de la Torre, M.L., Santisteban, M., Lobo, A., Sánchez Requena, J. (2014). Four abandoned mines, one acid mine drainage affected river and an unsolved issue for a water supply reservoir. *Proceedings of the Energy and Environment Knowledge Week 2014 Toledo, Spain 30th-31st – October* ISBN: 978-84-697-1162-0.

Salomons, W., Förstner, U. (1984). *Metals in the Hydrocycle*. Springer- Verlag, New York, 349 pp.

Sánchez-España, J., Velasco, F., Yusta, Y. (2000). Hydrothermal alteration of felsic volcanic rocks associated with massive sulphide deposition in the northern Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Applied Geochemistry*, 15, 1265-1290.

Sánchez-España, J., López-Pamo, E., Santofimia, E., Aduvire, O., Reyes, J., Baretino, D. (2005). Acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (Odiel river watershed, Huelva, SW Spain): Geochemistry, mineralogy and environmental implications. *Applied Geochemistry*, 20, 1320-1356.

Sánchez-España, J., Lopez Pamo, E., Santofimia, E., Reyes, J., Martin, J.A. (2006). The removal of dissolved metals by hydroxysulphate precipitates during oxidation and neutralization of acid mine drainage waters, Iberian Pyrite Belt. *Aquatic Geochemistry*, 12: 269-298.

Sánchez-España, J., López-Pamo, E., Santofimia, E. (2007). The oxidation of ferrous iron in acidic mine effluents from the Iberian Pyrite Belt (Odiel Basin, Huelva, Spain): Field and laboratory rates. *Journal of Geochemical Exploration*, 92, 120-132.

Sánchez-España, J., López-Pamo, E., Santofimia-Pastor, E. and Diez-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-Rodas, D., Gomez-Ariza, J.L., Giraldez, I., Velasco, A., Morales, E. (2005). Arsenic speciation in river estuarine waters from southwest Spain. *Science of the Total Environment* 345, 207-217.

Santisteban, M., Grande, J.A., de la Torre, M.L., Valente, T., Fernández, J.P. (2012). Estudio preliminar de la afección por AMD en embalses de la Faja Pirítica Ibérica. SIAGA2012, Instituto Geológico y minero de España, pp,535, Cádiz, 1-3 Octubre.

Santisteban, M., Grande, J.A., de la Torre, M.L., Valente, T., Cerón, J.C. (2013). Acid mine drainage in semi-arid regions: the extent of the problem in the waters of reservoirs in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Hydrology Research*. DOI: 102166/nh2013086.

Santisteban, M., Valente, T., Grande, J.A., de la Torre, M.L., Almeida, S., Pérez-Ostalé, E. and García Pérez, M. (2014a). Proposal of a model of the horizontal moving of pollutants in a water reservoir receiving acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Proceedings of the Energy and Environment Knowledge Week 2014 Toledo, Spain 30th-31st – October* ISBN: 978-84-697-1162-0.

Santisteban, M., Valente, T., Grande, J.A., de la Torre, M.L., Almeida, S., Pérez-Ostalé, E. and García Pérez, M. (2014b). Study of the transit and attenuation of pollutants in a water reservoir receiving acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Environmental Science and Pollution Research*. In press

Santisteban, M., Grande, J.A., de la Torre, M.L., Valente, T., Pérez-Ostale, E., Cerón, J.C (2014c). Fuzzy intelligence approach for modeling the migration of contaminants in a reservoir affected by AMD pollution. *Mine Water and the Environment*. DOI:10.1007/s10230-014-0321-5.

Santofimia-Pastor, E., López-Pamo, E. and Montero-González, E, (2011). La corta inundada de Aznalcóllar y su uso como vertedero de residuos mineros (Sevilla, España). *Boletín Geológico y Minero*, 122 (2), 235-246.

Sarmiento, A.M., (2007). Estudio de la contaminación por drenajes ácidos de mina de las aguas superficiales en la cuenca del río Odiel (SO España). Ph, Thesis, Universidad de Huelva.

Sarmiento, A.M., Nieto, J., Casiot, C., Elbaz-Poulichet, F., Ega, M. (2009). Inorganic arsenic speciation at river basin scales: The Tinto and Odiel rivers in the Iberian Pyrite Belt, SW Spain. *Environmental Pollution*, 157, 1202-1209.

Sarmiento, M., Nieto, J.M, Olías, M., Cánovas, C. (2009). Hydrochemical characteristics and seasonal influence on the pollution by acid mine drainage in the Odiel river Basin (SW Spain). *Applied Geochemistry*, 24 (2009) 697–714.

Schermerhorn, L.J.G. (1971). An outline of the stratigraphy of the Iberian Pyrite Belt. *Boletín Geológico y Minero*, 82, 239-268.

Shua, W.S., Yeb, Z.H., Lana, C.Y., Zhanga, Z.Q., Wongb, M.H. (2001). Acidification of lead/zinc mine tailings and its effect on heavy metal mobility. *Environment International*, 26, 389 – 394.

Silva, R.M., Sandoval, M.C., Veiga, M.M., Hinton, J.J., Klein, B. (2000). Earthworms as Bioindicators of Acid Rock Drainage. Proc. 7th Annual BC Metal Leaching/ARD Workshop. Vancouver, Nov. 29-30, 2000.

Singer P.C. y Stumm W., (1970). Acidic mine drainage: the rate determining step. *Science*, 167, 1121-1123.

Skousen, J., Rose, A., Geidel, G., Foreman, J., Evans, R., Hellier, W. (1998). Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage. Published by The National Mine Land Reclamation Center, West Virginia University, Morgantown, West Virginia, 123 pp.

Skousen, J., Sexstone, A., Garbutt, K., Sencindiver, J. (1994). Acid mine drainage treatment with wetlands and anoxic limestone drains. En: Kent, D.M. (Ed). Applied Wetlands Science and Technology. Lewis Publishers, Boca Raton, 263-281.

Smit, J.P. (1999). The Treatment of polluted Mine Water. En: Proceedings of the Congress of the International Mine Water Association. Sevilla, Spain, 13-17 September 1999. Volume II, 467-471.

Stecko, J.R.P., Bendell-Young, L.I. (2000). Contrasting the geochemistry of suspended particulate matter and deposited sediments within an estuary. Applied Geochemistry, 15, 753-775.

Sugeno, M., Yasukawa, A. (1993). A fuzzy-logic based approach to qualitative modelling. IEEE Trans Fuzzy Syst, 1, 7-31

Tavares, M.T., Sousa, A.J., Abreu, M.M. (2008). Ordinary kriging and indicator kriging in the cartography of trace elements contamination in São Domingos mining site (Alentejo, Portugal). Journal of Geochemical Exploration, 98 (1-2), 43-56.

Tornos, F., (2006). Environment of formation and styles of volcanogenic massive sulfides: the Iberian Pyrite Belt. Ore Geology Reviews 28, 259-307.

Tornos, F., (2008). La Geología y Metalogenia de la Faja Pirítica Ibérica. MACLA 10, pp, 13-23.

Torres, E., Ayora, C., Ruiz, C., Sarmiento, A.M. (2010). Geochemical controls of two water reservoirs that receive acid mine drainage in the Odiel Basin. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía. 13, 215.

U.S. Department of the Interior. (1970). Treatment of Acid Mine Drainage by Reverse Osmosis. Water Pollution Control Research Series, 14010 DYK 03/70.

U.S. Department of the Interior. (1990). Long term removal and retention of iron and manganese from acid mine drainage in wetlands. Vol. I. Bureau of Mines, USDI: Washington, DC.

USEPA (1994). Acid Mine Drainage Prediction. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Solid Waste. EPA530-R-94-036.

USEPA (2000). Coal remining best management practices guidance manual. Office of Science and Technology Engineering and Analysis Division. Washington DC. EPA 821-R-00- 007.

USEPA (2006). Acid mine drainage. Available from: http://water.epa.gov/polwaste/nps/acid_mne.cfm. Consulta: 20 Junio 2012.

Utgikar, V.P., Tabak, H.H., Haines, J.R., Govind, R., (2003). Quantification of toxic and inhibitory impact of copper and zinc on mixed cultures of sulfate-reducing bacteria. *Biotechnol Bioengineering*, 82, 306-312.

Valente, T. (1996).Evolução de sistemas actuais desequilibrados por intervenções extractivas. Exemplos do Minho. O couro mineiro de Valdearcas. Tese de Mestrado, Univ. Minho, Braga, 202 p.

Valente, T, Leal Gomes, C. (2005). Aplicação de lógica difusa na qualificação de impacte ambiental em escombros de minas abandonadas do NW de Portugal. Actas da XIV Semana de Geoquímica, VIII Congresso de geoquímica dos países de língua portuguesa, Aveiro, pp. 541-546.

Valente., T.M., Leal Gomes, C, (2007). The role of two acidophilic algae as ecological indicators of acid mine drainage sites. *Journal of Iberian Geology*, 33 (2). pp, 283-294.

Valente,T., Leal Gomes, C., (2009). Occurrence, properties and pollution potential of environmental minerals in acid mine drainage. *Science of the Total Environment*, 407, 1135-1152.

Valente, T.M., Antunes, M., Sequeira Braga, A., Prudencio, M. I., Marques, R., Pamplona, J. (2012a). Mineralogical attenuation for metallic remediation in a passive system for mine water treatment. *Environmental Earth Sciences*, 66, 39–54.

Valente, T., Grande, J.A., de la Torre, M.L., Cerón, J.C., Santisteban, M. (2012b). Estudio de las variaciones hidroquímicas en profundidad en un embalse afectado por procesos de drenaje ácido de mina. SIAGA2012, Instituto Geológico y minero de España, pp,557, Cádiz, 1-3 Octubre.

Valente, T. , Almeida, S. , Rivera, M.J ., Delgado, C., Gomes, P., de la Torre, M.L., Santisteban, M. , Grande, J.A.(2013). Relation between diatom communities and the degree of AMD affection in selected water dams in Iberian Pyrite Belt. *Mineralogical Magazine*. DOI:10.1180/minmag.2013.077.5.22

Valente, T., Grande, J.A, Cerón, J.C.¹, de la Torre, M.L. , Santisteban, M., Borrego, J. , Fernández, P., Sánchez-Rodas, D. (2014). Distribution of trace elements in a mining dam in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain): Sources and relationship between elements of environmental concern. *International Geology Review*. In Press.

Van Damme, P.A., Hamel, C., Ayala, A., Bervoets, L. (2008). Macroinvertebrate community response to acid mine drainage in rivers of the High Andes (Bolivia). *Environmental Pollution*, 156 (3), 1061-1068.

Veiga, M.M. and Meech, J.A. (1994). Application of fuzzy logic to environmental risk assessment. *Proc. 4th Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology*, p. 355-370. Concepcion, Chile, Nov. 20-23, 1994.

Veiga, M.M. and Meech, J.A. (1995a). A fuzzy Model for Risk Assessment. *Proc. of 1995 IEEE Int. Conf. Systems, Man & Cybernetics*, p.1640-1643, Vancouver, Oct 22-25, 1995

Veiga, M.M. and Meech, J.A. (1995b). An Adaptive Fuzzy Model for Risk Assessment of Mercury Pollution in the Amazon. *Proc. 6th Int. Fuzzy Systems Assoc. World Congress*. vol. 1, p. 489-492. São Paulo, July 22-28, 1995.

Veiga, M.M. and Meech, J.A., (1997). Fuzzy-neural Systems for Adaptive Reasoning on Environmental Risk Analysis. *MinelT '97, First International Symposium on Information Technologies in the Mineral Industry via the Internet*, organized by G. Panagiotou, December 1-12, 1997, CyberSpace and Athens, Greece, 10 HTML pages.

Vera, J.A. (2004). *Geología de España*, pp. 890, Serv. Geol. de España. Instituto Geológico y Minero de España (SGE/IGME), Madrid.

Vicente-Martorell, J.J., Galindo-Riaño, M.D., García-Vargas, M., Granado-Castro, Ma,D, (2008). Heavy metal speciation of estuarine sediments affected by acid mine drainage in the Tinto and Odiel estuary, Spain, Relationship to bioconcentration of fish tissues. *Fresenius Environmental Bulletin*, 17(10B), 1744-1754.

Von Altrock, C. (1995), *Fuzzy Logic&Neurofuzzy Applications Explained*, Prentice-Hall.

Wang, H, (2010). Characteristics of acid mine drainage and its pollution control, 2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, iCBBE 2010, art no, 5517409. *Water Works Association*, 37(10). 963-984.

Watzlaf, G., Hyman, D. (1995). Limitations of passive systems for the treatment of mine drainage. 17th Annual National Association of Abandoned Mine Lands Conference, Indiana, October, 186-199.

Watzlaf, G.R. (1998). Mine drainage characterization for the successful design and evaluation of passive treatment systems. Reunión "El agua en el cierre de minas", E.T.S. Ingenieros de Minas, Oviedo.

Weatherell, J.A., Deutsch, D., Robinson, C., Hallsworth, A.S. (1977). Assimilation of fluoride by enamel throughout the life of the tooth. *Caries Res.*, 11, 85–101.

Whiston, C. (1987). X-Ray Methods. Analytical Chemistry by Open Learning. Chippenham, Wiltshire, 426 p.

Wieder, R.K. (1993). Ion input/output budgets for five wetlands constructed for acid coal mine drainage treatment. *Water Air Soil Pollution*, 71 (3-4), 231-270.

Wildeman, T., Gusek, J. Brodie, G. (1991). Wetland design for mining operations. Draft handbook presented at the 1991 American Society for Surface Mining and Reclamation.

Wilke, B. (2005) - Determination of chemical and physical soil properties, in: Margesin, R., Schinner, F. (Eds.), *Manual of Soil Analysis*. Springer, 47-96 p.

Woulds, C., Ngwenya, B.T., 2004. Geochemical processes governing the performance of a constructed wetland treating acid drainage, Central Scotland. *Applied Geochemistry*. 19, 1773–1783.

Yen, J., Langari, R. (1999) *Fuzzy logic: intelligence, control and information*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

Younger, P.L. (1997). The longevity of minewater pollution: a basis for decision-making. *The Science of the Total Environment*, 194/195, 457-466.

Younger, P.L. (2001). Mine water pollution in Scotland: Nature, extent and preventative strategies. *Science of the Total Environment*, 265(1-3), 309-326..

Younger, P.L., Banwart, S.A., Hedin, R.S. (2002). *Mine water: Hydrology, Pollution, Remediation*. Environmental Pollution, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 5, 442 pp.

Younger, P.L. (2005). Corrección de aguas ácidas de mina: aplicación de métodos activos y pasivos en Europa. En: Baretino, D., Loredó, J., Pendas, F. (eds.), Acidificación de suelos y aguas: problemas y soluciones. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 212 pp

Yousuf, M., Mollah, M., Schennach, R., Parga, J.R., Cocke, D.L. (2001). Electrocoagulation (EC)-Science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84 (1), 29–41.

Zaiane, O. R. (1999). Principles of Knowledge Discovery in Databases. CMPUT690, Dept. of Computing Science, University of Alberta.

Zamzow, K.L., Tsukamoto, T.K., Miller, G.C. (2006). Waste from biodiesel manufacturing as an inexpensive carbon source for bioreactors treating acid mine drainage. *Mine Water and the Environment*, 25, 163-170.

Ziemkiewicz, P.F., Skousen, J.G., Brandt, D.L., Sterner, P.L., Lovett, R.J. (1997). Acid mine drainage treatment with armored limestone in open limestone channels. *Journal of Environmental Quality*, 26, 1017-1024.

