
**ESTUDIO SOBRE LA
INUNDACIÓN DE LOS POZOS
MINEROS EN LA ZONA
POLIO-TRES AMIGOS (VALLE
DEL RÍO SAN JUAN)**

TOMO I: MEMORIA

Julio 2009



Convenio de Colaboración entre el Grupo Hulleras del Norte, S. A. (Grupo HUNOSA), la Universidad de Oviedo y el Instituto Geológico y Minero de España para el "Estudio del funcionamiento hidrodinámico, aprovechamiento del CH₄ contenido en las capas de carbón y posibilidad de inyección y secuestro de CO₂ en los yacimientos de la Cuenca Central asturiana".

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	5
2.	ANTECEDENTES.....	7
3.	OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO	8
4.	MARCO GEOGRÁFICO	12
5.	RECOPIACIÓN Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	17
6.	CARACTERÍSTICAS DE LAS EXPLOTACIONES	19
6.1.	MINERÍA DE MONTAÑA	19
6.1.1.	<i>Grupos de montaña del valle del río San Juan.....</i>	<i>20</i>
6.2.	POZOS	22
6.2.1.	<i>Pozo Polio</i>	<i>23</i>
6.2.2.	<i>Pozo Tres Amigos.....</i>	<i>26</i>
6.2.3.	<i>Conexiones</i>	<i>28</i>
6.3.	VOLÚMENES DE HUECOS.....	30
6.4.	CAUDALES BOMBEADOS	31
7.	MARCO GEOLÓGICO	34
7.1.	ESTRATIGRAFÍA	36
7.2.	TECTÓNICA	41
8.	ESTUDIO CLIMÁTICO	43

8.1.	INTRODUCCIÓN	43
8.1.1.	<i>Precipitaciones</i>	43
8.1.2.	<i>Temperaturas</i>	45
8.1.3.	<i>Balance hídrico</i>	46
8.2.	APLICACIÓN A LA ZONA DE ESTUDIO	47
8.3.	VALIDACIÓN DE DATOS Y OBTENCIÓN DE SERIES COMPLETAS DE PRECIPITACIÓN ..	51
9.	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO.....	61
9.1.	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DE LOS MATERIALES PRESENTES	61
9.2.	CARTOGRAFÍA HIDROGEOLÓGICA	66
9.3.	INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA.....	69
9.4.	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO.....	75
10.	BALANCE HÍDRICO.....	79
10.1.	DELIMITACIÓN DE LA CUENCA	79
10.2.	CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN Y LA LLUVIA ÚTIL.....	81
10.3.	CÁLCULO DE LA ESCORRENTÍA	83
10.3.1.	<i>Metodología</i>	84
10.3.2.	<i>Aforo del río San Juan</i>	88
10.4.	CÁLCULO DE LA INFILTRACIÓN	93
11.	ESTUDIO HIDROQUÍMICO.....	98
11.1.	METODOLOGÍA	98
11.1.1.	<i>Red de calidad, criterios de selección</i>	98
11.1.2.	<i>Muestreo para análisis químico</i>	100
11.1.3.	<i>Análisis químicos Laboratorio CAASA</i>	101
11.1.4.	<i>Interpretación de la información</i>	103
11.2.	RESULTADOS	108
11.2.1.	<i>Determinaciones “in situ”</i>	108
11.2.2.	<i>Análisis químicos</i>	109
11.2.3.	<i>Caracterización hidroquímica, representaciones gráficas, relaciones iónicas y correlación estadística</i>	115

11.2.4. Estabilidad mineral.....	119
11.3. INTERPRETACIÓN HIDROQUÍMICA	122
11.4. EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS POZOS POLIO Y TRES AMIGOS	129
12. PROCESO DE INUNDACIÓN	134
12.1. ESTUDIO DEL PROCESO DE INUNDACIÓN DEL POZO POLIO	134
12.2. ESTUDIO DEL PROCESO DE INUNDACIÓN DEL POZO TRES AMIGOS	140
12.2.1. Seguimiento y Monitorización.....	141
12.3. MODELO DE INUNDACIÓN	149
13. RIESGOS DE AFECCIÓN DEL PROCESO DE INUNDACIÓN.....	152
14. POSIBILIDADES DE APROVECHAMIENTO DEL AGUA	153
15. CONSIDERACIONES FINALES.....	158
BIBLIOGRAFÍA	161

1. INTRODUCCIÓN

En el mes de febrero de 2005, en el transcurso de unas sesiones científico-técnicas relacionadas con la minería y su impacto sobre las aguas subterráneas que se celebraron en la Universidad de Oviedo, se produjo un primer contacto entre técnicos de la Oficina de Proyectos en Oviedo del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y los entonces Director General de Minería y Director Técnico de Aprovisionamiento de la Empresa Nacional Hulleras del Norte, S.A. (HUNOSA).

A partir de ese momento, tuvo lugar una primera reunión de trabajo, celebrada el día 10 de marzo, y otras posteriores, a las que se incorporaron investigadores del Departamento de Explotación y Prospección de Minas de la Universidad de Oviedo, para discutir la redacción de lo que se planteó como un Convenio Marco de colaboración entre el Grupo HUNOSA, el IGME y la Universidad de Oviedo para el desarrollo de trabajos incluidos en proyectos de investigación relacionados con el agua subterránea y la minería de carbón, el posible aprovechamiento del CH₄ contenido en las capas de carbón y la posibilidad de almacenamiento de CO₂ en estructuras geológicas subterráneas adecuadas a tal fin.

Estas gestiones se demoraron en el tiempo por diversas circunstancias, pero finalmente condujeron a la obtención consensuada del articulado definitivo del documento. Así, el día 5 de septiembre de 2006, en las instalaciones del Campus Universitario de Mieres, el Presidente del Grupo HUNOSA, el Rector Magnífico de la Universidad de Oviedo y el Director General del IGME firmaron el Convenio de Colaboración entre el Grupo Hulleras del Norte, S. A. (Grupo HUNOSA), la Universidad de Oviedo y el Instituto Geológico y Minero de España para el “Estudio del funcionamiento hidrodinámico, aprovechamiento del CH₄ contenido en las capas de carbón y posibilidad de inyección y secuestro de CO₂ en los yacimientos de la Cuenca Central asturiana”.

Para dar cumplimiento a lo expresado en las cláusulas tercera y cuarta del Convenio, el día 13 de octubre de 2006 tuvo lugar una reunión en la que se constituyeron la Comisión de Seguimiento y el Comité de Dirección de dicho Convenio, formados por representantes de las tres instituciones, que comenzaron su actividad en ese momento dirigidos por D. Claudio Álvarez Rodríguez, Director General de Ingeniería y Nuevos Desarrollos del Grupo HUNOSA. No obstante, y por diversas razones, se puede considerar que el inicio real de esta investigación, con la ejecución de los primeros trabajos incluidos en los distintos proyectos, tuvo lugar en el mes de enero de 2007.

En lo referente al proyecto de investigación hidrogeológica, y una vez finalizada la realización del estudio hidrogeológico en el sector Barredo-Valle del Turón-Valle del Aller, cuyo Informe Final se entregó en enero de 2009, se decidió continuar con esta investigación en el sector denominado Polio-Tres Amigos, en el ámbito geográfico del valle del río San Juan, que incluye los dos pozos mineros citados, ahora inactivos.

2. ANTECEDENTES

La zona objeto del presente proyecto de investigación se encuentra situada en el sector central de Asturias, en la cuenca del río San Juan, siendo la localidad de Mieres el principal núcleo urbano. En esta zona, eminentemente industrial, la minería de carbón destacó como principal actividad durante la mayor parte del siglo pasado hasta estos últimos años.

Así, en el sector norte del área de estudio se sitúan los Pozos Polio y Tres Amigos, en el margen sur del río San Juan. El Pozo Polio comenzó su actividad extractiva en el año 1953, como propiedad de la empresa Fábrica de Mieres, S.A., y en el año 1967 se integró al grupo de explotaciones mineras que se agruparon en la Empresa Nacional Hulleras del Norte, S.A. (HUNOSA) desde el momento de su creación; su actividad minera finalizó en el año 1993, aunque continuaron las labores de desagüe hasta enero de 1996. El desarrollo del Pozo Tres Amigos es similar, comenzó su actividad extractiva en el año 1939 y finalizó en el año 2002 comenzando su etapa de inundación.

3. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

El objeto del presente Convenio es la colaboración del Grupo HUNOSA, la Universidad de Oviedo y el IGME para la realización del Estudio del funcionamiento hidrodinámico, aprovechamiento del CH₄ contenido en las capas de carbón y posibilidad de inyección y secuestro de CO₂ en los yacimientos de la Cuenca Central asturiana, promovido por el Grupo HUNOSA por ser consciente, en lo que se refiere al estudio de funcionamiento hidrodinámico citado, de la importancia de las aguas subterráneas almacenadas en sus estructuras mineras y de la problemática que podrían generar en su entorno.

Para alcanzar este objetivo, se decidió la realización de una serie de actividades dirigidas fundamentalmente a la consecución de dos fines:

- La elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual y de un modelo hidrodinámico de flujo que permitan determinar las características del proceso de inundación consecuente al abandono de las labores de desagüe en los distintos pozos mineros, y su posible impacto sobre el medio ambiente en el entorno geográfico de los mismos, caracterizando además los depósitos subterráneos que van a resultar de este proceso en la Cuenca Central asturiana, así como la realización de un estudio hidroquímico que permita conocer la calidad de este agua y la distribución espacio-temporal de su composición en dicho ámbito geográfico.
- El análisis de la posibilidad de integrar las aguas sobrantes de la actividad minera y las de desagüe de las instalaciones inactivas, en condiciones óptimas de coste y salubridad, en la gestión global de los recursos hídricos de este sector de la región asturiana como elementos de suministro, regulación, transporte y distribución, entre otros, con el fin de lograr la utilización conjunta de las aguas superficiales y subterráneas en la Cuenca Central.

Para la consecución de estos fines se planificó cuidadosamente un plan de trabajo que incluyó la ejecución de las siguientes tareas:

- Recopilación y tratamiento de toda la información existente, incluyendo fundamentalmente todos los datos geológicos, hidrogeológicos y mineros relacionados con la zona de trabajo.

- Elaboración de un Sistema de Información Geográfico (GIS) para dar soporte a toda la información generada en el proyecto, así como cartografía geológica y modelo geológico en 3D de la Cuenca Central.

- Realización de una cartografía hidrogeológica del área de estudio, a escala 1:25.000.

- Realización de un Inventario de Puntos de Agua con la inclusión de manantiales, sondeos, pozos y labores mineras.

- Elaboración de un estudio climatológico con la confección de mapas de pluviometría, temperatura, lluvia útil, etc. de la Cuenca Central asturiana.

- Realización de un estudio hidrogeológico de la zona de trabajo, que incluirá estudios de funcionamiento hidrogeológico (recarga y descarga de los niveles permeables, caracterización de parámetros hidrogeológicos, etc.), del impacto de la minería en el sistema hidrogeológico en régimen natural y del modelo conceptual de funcionamiento.

- Realización de un estudio hidroquímico, con la definición de una red de control de la calidad química del agua subterránea.

- Elaboración de un modelo matemático de flujo subterráneo que permita, a partir del conocimiento de la situación actual del sistema hidrogeológico, prever la respuesta de este sistema ante el cierre e inundación de las explotaciones mineras, así como ante la posibilidad de aprovechamiento del agua subterránea existente en las labores mineras inactivas.

- Redacción del Informe Final del proyecto, que incluirá una memoria y un anexo de planos, además de los correspondientes que recojan los datos analizados en las distintas labores desarrolladas en el plan de trabajo.

Para llevar a cabo la realización de todas estas tareas se formó un equipo de trabajo, dirigido por D. César Cordero Escosura, Director de Nuevos Desarrollos del Grupo HUNOSA, compuesto por las siguientes personas:

Por parte del Grupo HUNOSA intervinieron Dña. Belén Garzón Súcar y D. Noel Canto Toimil, destinados a la realización de este proyecto con dedicación parcial al mismo.

Por parte de la Universidad de Oviedo participaron Dña. Almudena Ordóñez Alonso, profesora titular, Dña. Isabel Fernández Mairlot, becaria, y D. Luis Manuel Lara Gómez, personal contratado para este proyecto con dedicación exclusiva al mismo, bajo la dirección de D. Jorge Loredo Pérez, Director del Departamento de Explotación y Prospección de Minas.

Por parte del IGME, además de la dedicación exclusiva de Dña. Eva Martos de la Torre, contratada temporal con cargo a este proyecto, intervino Dña. Mónica Meléndez Asensio, técnico de la Oficina de Proyectos del IGME en Oviedo, con la colaboración de D. Carlos Zapatero Menchero como auxiliar de campo, todos ellos bajo la dirección de D. Miguel Luis Rodríguez González, jefe de dicha Oficina de

Proyectos. Además, y como asesores del equipo de trabajo en temas puntuales, intervinieron los técnicos del IGME D. Luis Laín Huerta y D. Miguel Llorente Isidro.

Además, la empresa SADIM tuvo una participación fundamental en este proyecto con la elaboración del GIS, el modelo hidrodinámico de flujo y las labores informáticas para la confección de las cartografías geológica e hidrogeológica, el modelo geológico 3D, etc. Su equipo de trabajo incluyó a D. Ramón Rodríguez Menéndez, D. Román Fernández Reiriz, D. Tomás García Gutiérrez y D. Martín Gaitto Piris.

4. MARCO GEOGRÁFICO

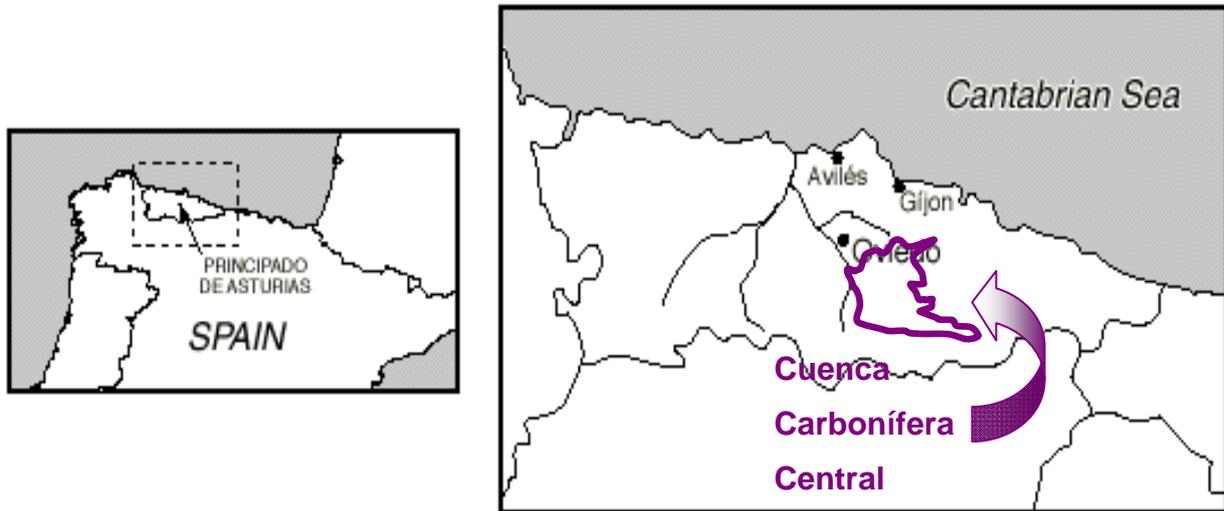


Figura 4-1.- Situación de la Cuenca Carbonífera Central

El área de estudio está localizada en el sector central de Asturias, dentro de la Cuenca Carbonífera Central (Figura 4-1), y más concretamente en la margen oriental del río Caudal, entre los valles de los ríos Nalón y Turón, situados al norte y sur de la zona de trabajo respectivamente.

La extensión de esta zona se ha definido en función del área de influencia de las labores mineras, tanto de valle como de montaña, situadas en este valle. Los principales pozos en la minería de valle son Polio y Tres Amigos; en cuanto a minería de montaña, el grupo más destacable es Baltasara.

La zona de estudio ocupa una parte del término municipal de Mieres. La superficie de terreno comprendido entre sus límites supone un área aproximada de 27 km², y está incluido en un rectángulo cuyos vértices son los puntos que tienen por coordenadas aproximadas U.T.M. las siguientes (Figura 4-2):

Punto 1: X: 274.500, Y: 4.796.000 Punto 2: X: 282.500, Y: 4.796.000

Punto 3: X: 274.500, Y: 4.790.000 Punto 4: X: 282.500, Y: 4.790.000

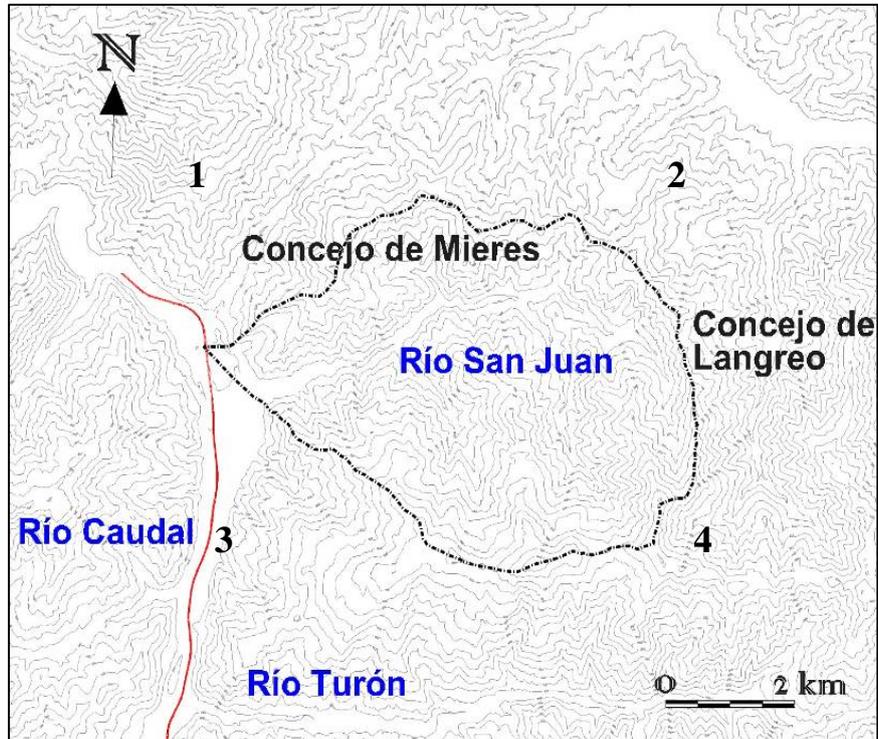


Figura 4-2.- Límites de la zona de estudio

Desde el punto de vista topográfico, ésta es una zona montañosa abrupta, que puede presentar desniveles superiores a los 1.500 m en distancias de 50 km, como corresponde a una de las regiones con orografía más accidentada de la Península Ibérica, y cuenta con desarrollo de valles con laderas muy pendientes, especialmente en las zonas de cabecera de los ríos que la atraviesan (Figura 4-3).



Figura 4-3.- Orografía de las cuencas de los principales ríos de la Cuenca Carbonífera Central asturiana

Este sector se encuentra situado a unos 50 km de la costa, por lo que el clima se corresponde con el establecido para el dominio oceánico de Europa occidental (Capel Molina, 1981), con precipitaciones abundantes todo el año (pluviometría media en torno a los 1.200 mm/año), temperaturas medias próximas a los 12 °C, baja insolación e inexistencia de aridez. Está condicionado principalmente por la latitud de su ubicación geográfica, la influencia atemperadora del mar y sus características topográficas.

Se puede destacar que la distribución temporal de la precipitación en esta región es fuertemente estacional (Figura 4-4): el invierno y la primavera son habitualmente muy lluviosos, mientras que la llegada del verano y el predominio de masas de aire subtropicales provocan la disminución de la precipitación, solamente reactivada por el efecto orográfico sobre los vientos del norte; en este periodo estival, la frecuencia e intensidad de las precipitaciones aumentan hacia el sector oriental de la Cordillera Cantábrica (Marquínez García *et al.*, 2003).

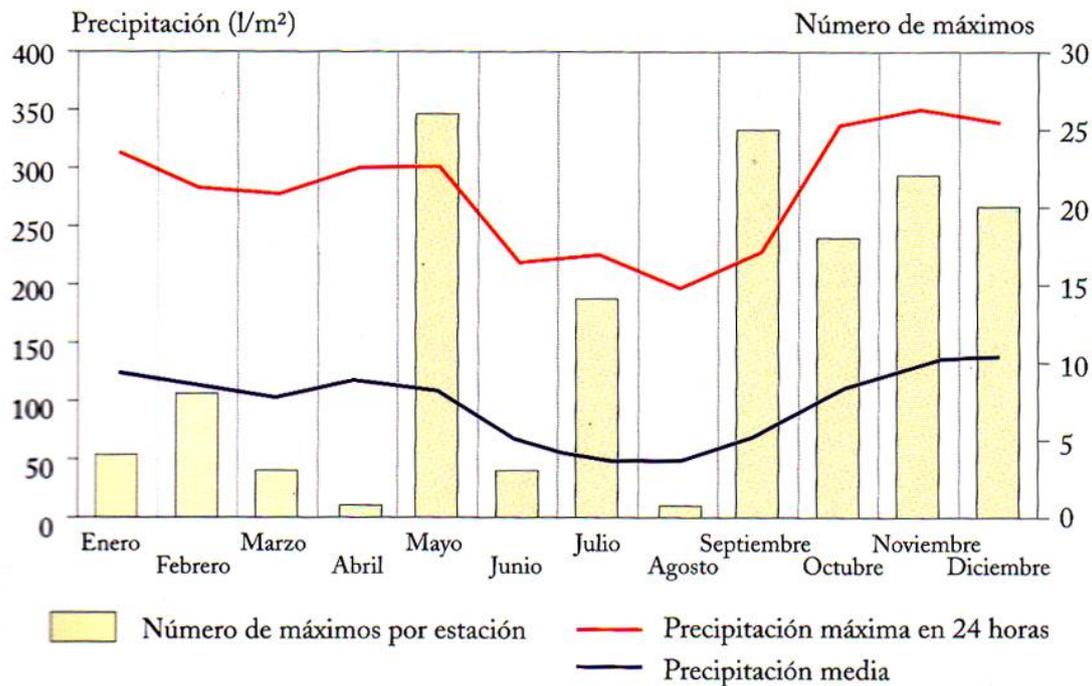


Figura 4-4.- Valores medios mensuales de precipitación máxima en 24 horas, precipitaciones medias y número de máximos por estación elaborados a partir de los datos de 145 estaciones par aun intervalo de 24 años (Marquinez García *et al.*, 2003)

Otra característica de esta zona es la alta densidad de vegetación, que dificulta enormemente la realización de la cartografía geológica y minera y mitiga los impactos de la actividad extractiva (por ejemplo, la relativamente rápida regeneración de las escombreras). Este hecho, junto con las tasas de insolación presentes, da lugar a una cifra elevada de evapotranspiración, que puede superar en ocasiones el 50% de la tasa de precipitación.

Desde el punto de vista hidrográfico, la zona de estudio engloba la cuenca del río San Juan, que discurre, desde su nacimiento dentro de los terrenos pertenecientes a la explotación de cielo abierto de San Victor, en dirección y sentido S-N en su cabecera girando a E-O a la altura de Santa Rosa, desembocando posteriormente en el río Caudal a la altura de la localidad de Mieres.

Desde el punto de vista hidrológico, el área de influencia de la zona de estudio abarca los límites de la cuenca hidrográfica del río San Juan, dentro de la cual se encuentran las labores mineras que han modificado el carácter hidrológico de dicha zona de estudio, como son los pozos mineros Polio y Tres Amigos, y las minas de montaña relacionadas con ellos.

5. RECOPIACIÓN Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Durante la primera fase del desarrollo de este proyecto se ha procedido a la recopilación y tratamiento de la información existente sobre aspectos que se consideraron necesarios para el conocimiento y desarrollo del trabajo. Asimismo se recopiló información geológica, geotécnica, hidrogeológica, etc., relacionada con las labores mineras. Esta tarea ha sido dificultosa debido a la variedad de fuentes y lugares donde se encontraba la información y a la falta, en muchos casos, de índices de búsqueda para tal fin. Una parte de los datos requeridos no han podido ser localizados, por lo que este trabajo ha tenido que ser realizado con menos información de la necesaria en algunos aspectos.

Algunas de las fuentes que aportaron información fueron los servicios de documentación del Grupo HUNOSA, el Instituto Geológico y Minero de España y la Universidad de Oviedo, miembros integrantes del Convenio, así como otros organismos y empresas, como es el caso de FCC Construcciones, el Servicio de Patrimonio de la Consejería de Cultura, Comunicación Social y Turismo del Principado de Asturias, los ayuntamientos de Mieres y de Aller, AQUALIA, el Instituto Nacional de Meteorología, AITEMIN, I.T.K. Ingeniería, INDUROT e HIPSITEC.

Los datos aportados por el Grupo HUNOSA incluyen mapas geológicos, planos de labores y cortes estratigráficos de los pozos, así como esquemas de relación y comunicación con los de su entorno, realizados por la empresa o por otras empresas para el Grupo HUNOSA, como, por ejemplo, los mapas a escala 1:10.000 elaborados por E.N.A.D.I.M.S.A., informes y planos relacionados con las labores mineras y el comportamiento del agua en ellas, etc. Los datos sobre las labores mineras (tanto de montaña como de fondo de valle) se han sintetizado con el fin de obtener una idea

clara de la información existente y poder así facilitar su tratamiento. Para esta labor se ha recurrido al Archivo Histórico del Grupo HUNOSA, situado en las instalaciones del Pozo Fondón, y a los departamentos de Topografía de los pozos situados en la zona de trabajo. Se han considerado de interés, entre otros, los esquemas de labores y conexiones, esquemas de canales de desagüe, datos históricos sobre caudales de bombeo, niveles piezométricos actuales de algunos pozos y cifras del volumen de los huecos creados por las labores extractivas.

El Instituto Geológico y Minero de España ha aportado toda la información disponible, que incluye el inventario de puntos de agua y escombreras de la zona de estudio, informes de estudios realizados en aguas de mina de la cuenca, mapas de paquetes mineros del área de estudio, etc.

La Universidad de Oviedo ha aportado información bibliográfica relacionada con el tema del trabajo, como es el caso de tesis y proyectos fin de carrera, informes e inventarios de puntos de agua realizados durante la docencia.

También han sido utilizados varios informes geotécnicos aportados por empresas y entidades que han realizado estudios en esta zona, como es I.T.K. Ingeniería. El INDUROT ha aportado el Mapa de Zonas de Riesgo de Inundación, a escala 1:10:000, que incluye los depósitos cuaternarios de la llanura aluvial de los ríos Caudal, Aller y Turón. La empresa HIPSITEC ha realizado informes relativos al aprovechamiento de las aguas. Por último, el Ayuntamiento de Mieres ha aportado información que ha ayudado a la elaboración del inventario de puntos de agua.

A partir de toda la información geológica recopilada, especialmente el estudio de ENADIMSA, se realizó un mapa geológico digital de superficie en 3D de la zona de estudio (Anexos I.2 y II.2). Asimismo, con los datos de geología del subsuelo e información minera se elaboró un modelo 3D de la geología del área estudiada.

6. CARACTERÍSTICAS DE LAS EXPLORACIONES

En esta memoria se mencionan tres tipos de labores mineras, que corresponden a "minería de montaña" y "minería de fondo de valle o de pozo". Para su representación gráfica se ha elaborado un mapa de situación de labores mineras (Anexo II.1), en el que se representan los pozos mineros y las bocaminas de minería de montaña que han sido localizadas durante la realización del inventario de puntos de agua, del que se hablará con detalle en el capítulo 9.

6.1. MINERÍA DE MONTAÑA

El comienzo de la actividad minera en la Cuenca Carbonífera Central de Asturias tuvo lugar a través de las minas de montaña. Numerosas fueron las capas explotadas tanto por las empresas importantes de la época como por pequeñas explotaciones privadas, por lo que es difícil la recopilación de la información referente a la totalidad de la minería de montaña. En este capítulo se van a mencionar los principales grupos mineros cuyas labores se sitúan dentro de la zona de trabajo, algunos de los cuales dieron paso, posteriormente, a la minería de fondo de valle.

De las labores de montaña que se van a mencionar a continuación, parte han sido representadas en el mapa de labores mineras del Anexo II.3.1 y en las figuras presentadas en el texto (Figura 6-1).

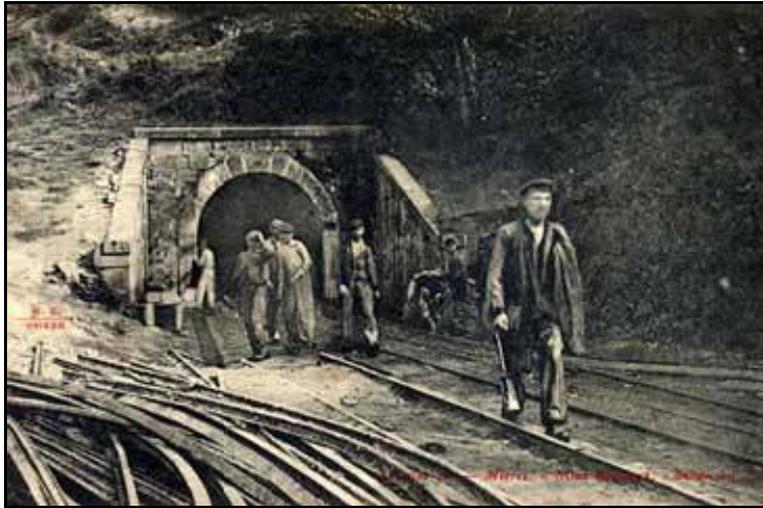
6.1.1. GRUPOS DE MONTAÑA DEL VALLE DEL RÍO SAN JUAN

En el valle del río San Juan la principal minería de montaña es la correspondiente la Mina Baltasara, representada en color rosa en la Figura 6-1. Perteneció a la empresa Fábrica de Mieres, S.A, y su explotación finalizó en el año 1969.

Situadas sobre el valle de Polio, paraje de Santa Rosa, término municipal de Mieres, se explotaron los mismos paquetes y capas que fueron laboreados posteriormente en el pozo Polio. Las labores, todas de montaña, se realizaron en las zonas de Centella y Mariana.

En la zona de Centella-Polio, el piso más alto fue el 10º, pero los trabajos de deshulle llegaron hasta superficie. Se explotaron los paquetes Maria Luisa, Sotón y Entrerregueras. En la zona de Mariana el piso más alto en el que se realizaron labores mineras fue el 13º, y en algunas capas se llegó hasta superficie. Se explotaren los paquetes Maria Luisa, Sotón, Entrerregueras y Sorriego.

Uno de los acontecimientos trágicos de la minería asturiana acaeció en la mina Baltasara, producido por la explotación de grisú, el 16 de julio de 1923, que acabó con la vida de 13 mineros. En la Fotografía 6-1 se puede ver uno de los relevos saliendo por una de las bocaminas de Baltasara.



Fotografía 6-1. Mina Baltasara (Mieres, Asturias), año 1900. (Sanchis, 2007)

También se han localizado en esta zona planos de otras labores mineras que se encuentran sin identificar, representados en color verde en la Figura 6-1, posiblemente también pertenecientes a la mina Baltasara.

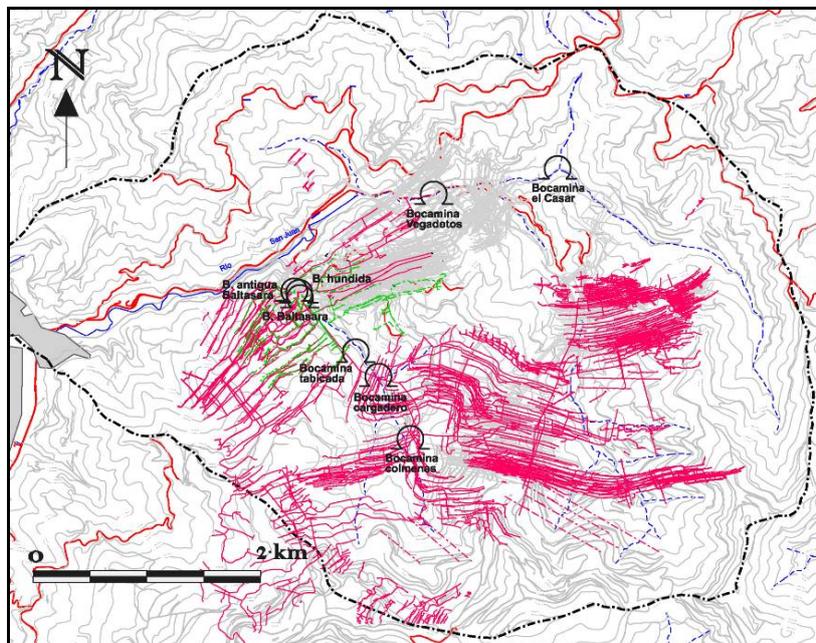


Figura 6-1.- Mapa en planta de las labores mineras de la mina Baltasara

6.2. POZOS

Como ya se vio anteriormente, además de las explotaciones mineras de montaña existen una serie de pozos mineros, cuyas labores se representan en el mapa a escala 1:25.000 incluido en el Anexo II.3.2, que en el texto se menciona como minería de fondo de valle, los cuales se van a describir brevemente, así como las conexiones existentes entre ellos.

Como pozos principales, en la cuenca del río San Juan se encuentran los pozos Polio y Tres Amigos (Figura 6-2), entre los cuales no se han descrito conexiones entre sí de ningún tipo. Existen también otra serie de pozos de menor entidad (pozos auxiliares o pozos-plano), como son el Pozo Peñón (auxiliar del Pozo Tres Amigos) y el Pozo plano interior Corzas y Pozo plano Rosolores, que no se sitúan en el valle y no se describirán por su escasa repercusión para este estudio.

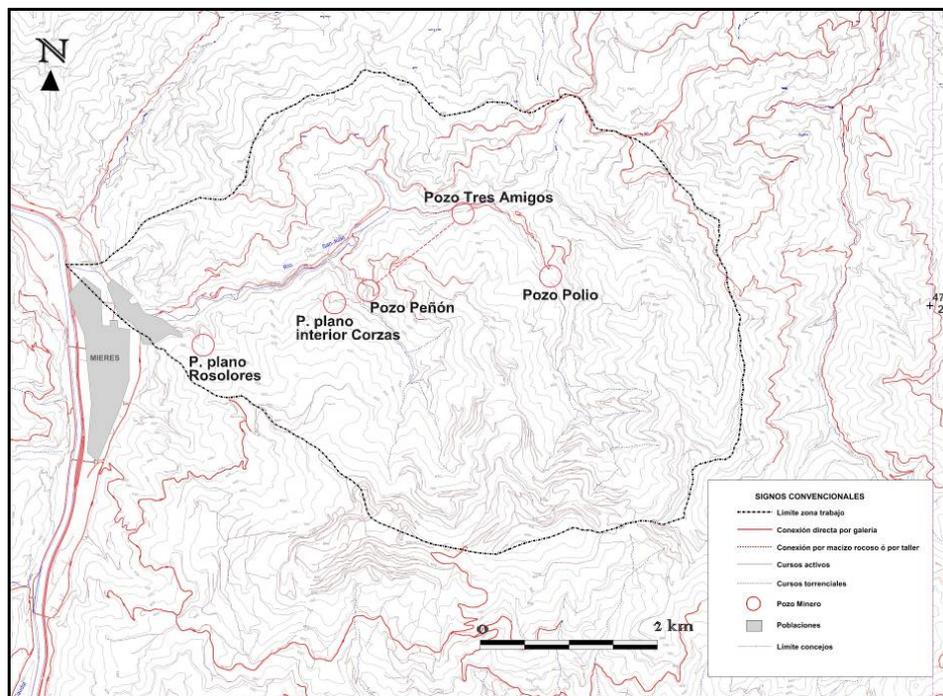


Figura 6-2.- Mapa de situación de los pozos mineros donde se señalan las conexiones en planta de pozos principales

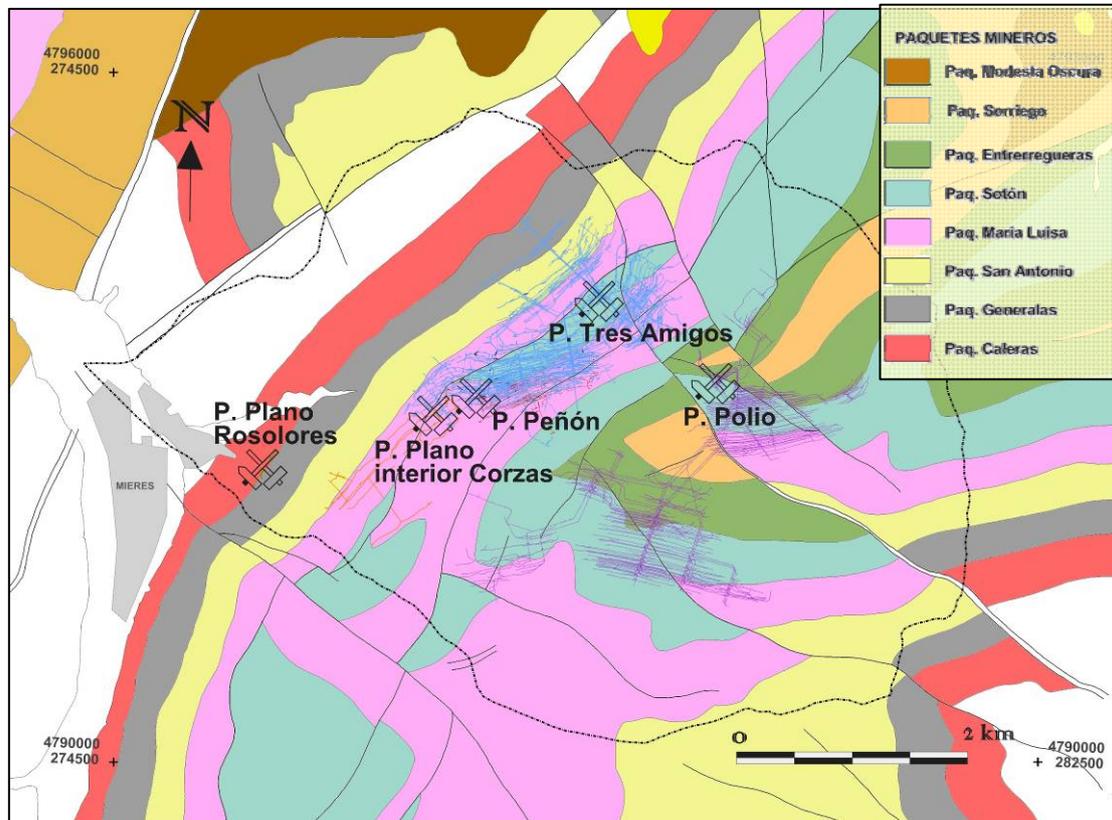


Figura 6-3.- Esquema de labores en planta y estructural de la CCC

En el trazado de las labores mineras de estos pozos se puede ver un reflejo de las estructuras geológicas que dieron forma a la Cuenca Carbonífera Central asturiana (Figura 6-3).

6.2.1. POZO POLIO

El Pozo Polio (Fotografía 6-2) se sitúa al este de la zona de estudio, en la margen izquierda del río San Juan (en coordenadas U.T.M. $x = 279.725$, $y = 4.793.315$), en el denominado valle de Polio, dentro del término municipal de Mieres (Figura 6-2). Su actividad minera comenzó en el año 1953, como propiedad de la empresa Fábrica de Mieres, S.A., y finalizó en 1993, momento en el que formaba parte del Grupo HUNOSA, al que se había incorporado en el año 1967.



Fotografía 6-2.- Vista del Pozo Polio

El pozo Polio explotó principalmente el flanco Sur del Sinclinal de Baltasara (Figura 6-4). La estructura está dividida por una falla en dos explotaciones diferentes: zona de Polio-Centella con buzamiento medio de 70° y la zona de Mariana con buzamiento medio de 76° .

Está formado por un pozo principal - de extracción – con brocal que se sitúa a +353 m s.n.m., y un pozo auxiliar situado a unos 30 m,. La profundidad total de la caña del pozo es de 610 m, y consta de 5 plantas situándose el embarque de 5ª a + 17,5 m s.n.m, como se puede ver en la Figura 6-5

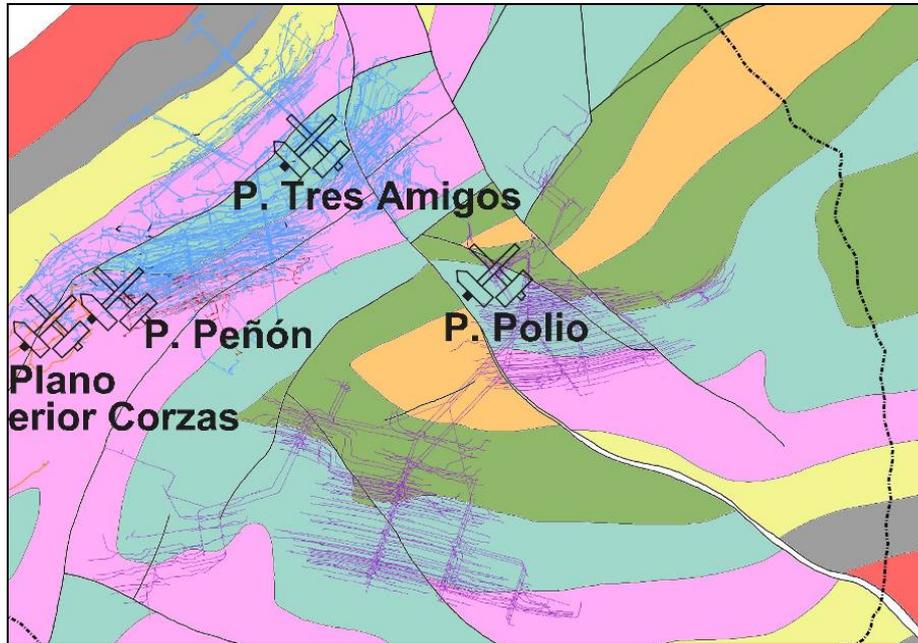


Figura 6-4.- Esquema de labores en planta de los Pozos Polio y Tres amigos

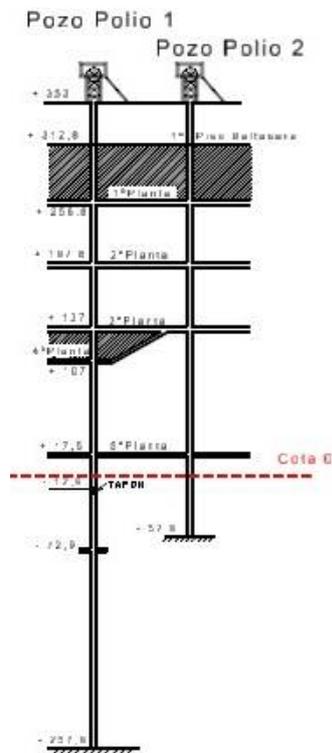


Figura 6-5.- Esquema de labores en perfil del Pozo Polio

El sistema de desagüe del pozo está formado por una red de tuberías por donde se bombea el agua desde tercera planta hasta un canal de vertido. Desde ahí se conduce el agua al río San Juan. En los últimos años (2002 a 2007) se bombeó una media de 49 L/s, siendo el caudal medio de bombeo durante el año 2007 de 34 L/s.

6.2.2. POZO TRES AMIGOS

El Pozo Tres Amigos (Fotografía 6-3), ubicado muy próximo a la localidad de Rioturbio, término municipal de Mieres (en coordenadas U.T.M. $x = 278.710$, $y = 4.794.054$), está formado por una caña de pozo vertical, cuyo brocal está a una cota de + 313,72 m s.n.m. La explotación de este conjunto comenzó en 1939 y finalizó a comienzos del año 2002.

El pozo Tres Amigos explotó principalmente el flanco Norte del Anticlinal Complejo de Santa Rosa (Figura 6-4), explotando los paquetes Maria Luisa, San Antonio y Sotón. El Pozo Tres Amigos consta de 8 plantas, la última se sitúa a - 120,96 m s.n.m. (Figura 6-6). Tiene una profundidad máxima de 500,72 m, hasta llegar a cota de 187 bajo el nivel del mar, y un pozo auxiliar llamado Pozo Peñón, con brocal a cota 344,8 m s.n.m., que tiene una profundidad que llega hasta 3ª planta del Pozo Tres Amigos, siendo esta la comunicación inferior entre ambos.



Fotografía 6-3.- Vista del Pozo Tres Amigos

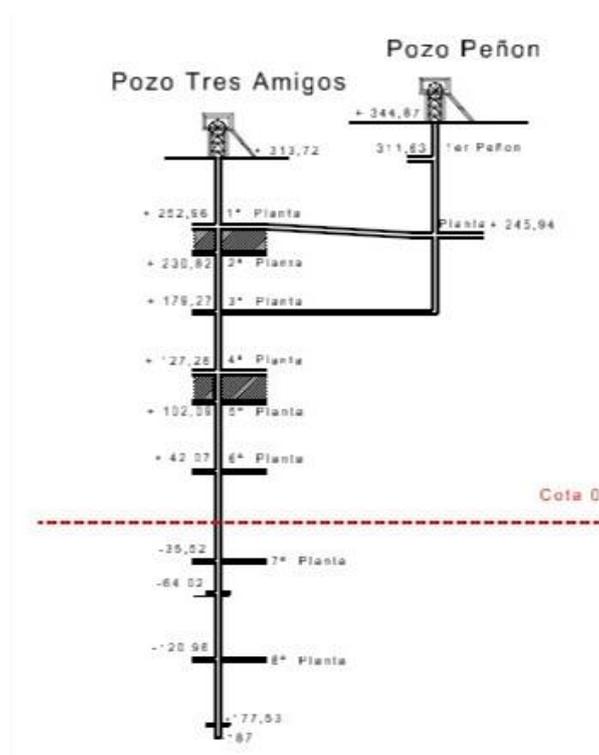


Figura 6-6.- Esquema de labores en perfil del pozo Tres Amigos

El desagüe se realiza en horas nocturnas por medio de una bomba de achique FLYGT Modelo: 2400 MT conectada a un mangón de caucho de diámetro 250 mm. En la actualidad el vertido del agua se realiza a través de un colector al río San Juan.

6.2.3. CONEXIONES

Como se indicó anteriormente, no existen conexiones conocidas entre los pozos Polio y Tres Amigos. Sí existen cuatro cales por chimenea en capa (HUNOSA, 1997): 3ª p Samuño- 3ªp Polio (+136m: +143m).

Comunicación mediante talleres por 3ª planta (cota 137m) con 3ª planta del Pozo Samuño (124 m) (Figura 5) (González González y Sáenz de Santa María Bedit, 1999). El Pozo Samuño ha terminado actualmente entre un panel entre la 10ª planta (-310,21 m) y la Sub-10ª planta (-389,52 m) que se inició el 1-11-2005.

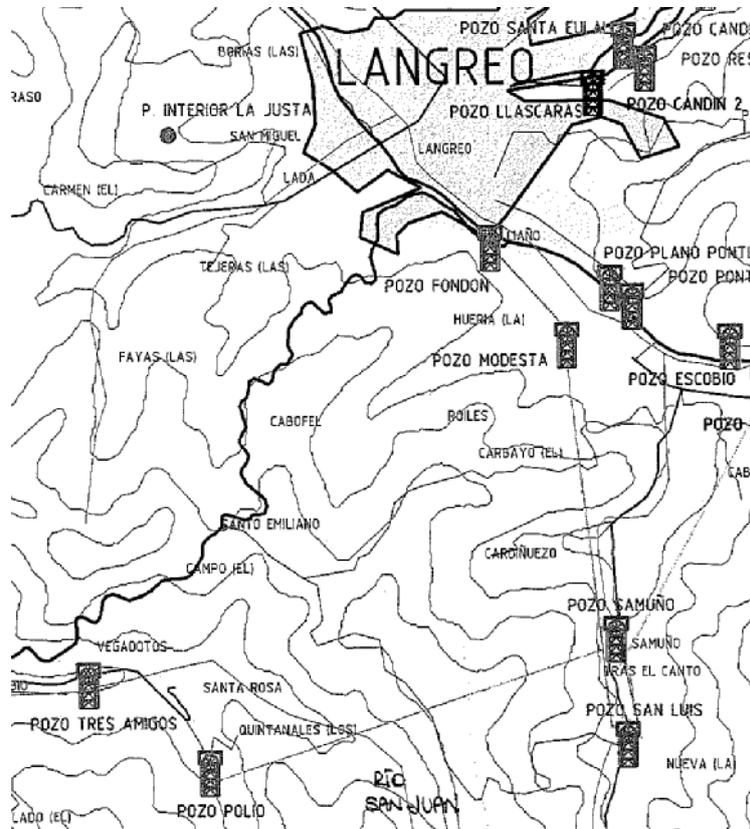


Figura 6-7.- Conexiones entre Polio y Samuño (HUNOSA, 1997)

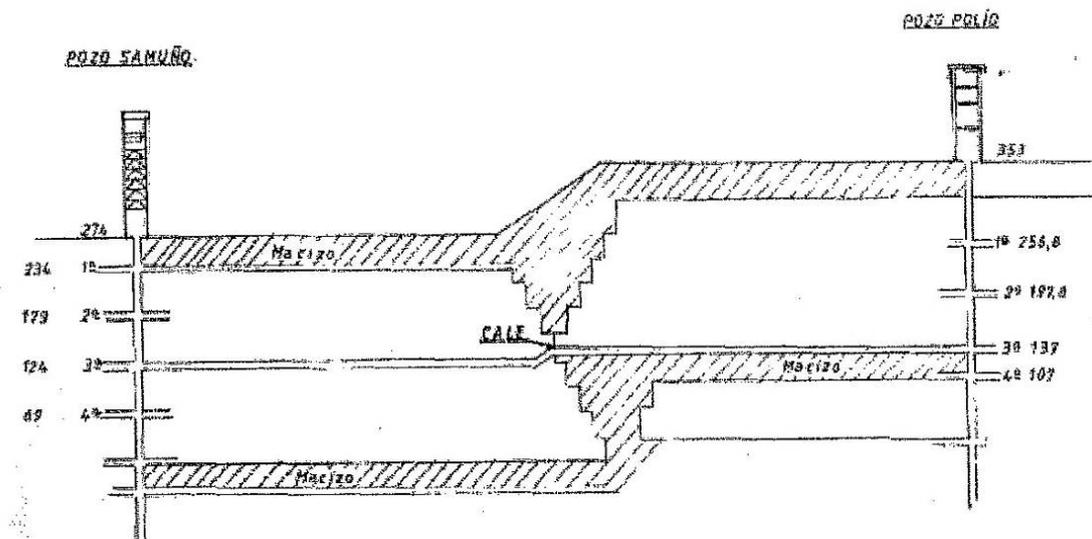


Figura 6-8.- Conexiones entre Polio y Samuño (González González y Sáenz de Santa María Benedit, 1999).

6.3. VOLÚMENES DE HUECOS

El cálculo del volumen de huecos se ha dividido en dos términos: por una parte, se calculó el volumen de huecos que corresponde a galerías mineras a partir de los planos de labores de los distintos pozos, y, de otra parte, se analizó el volumen de huecos correspondiente al área deshullada.

Para el cálculo del primer término del volumen de huecos disponible se realizó el producto de los kilómetros totales de galería de cada pozo (calculados a partir de la longitud de las labores mineras, de la versión digital de los planos de labores), por una sección media de 10 m².

A este volumen se le añade posteriormente un segundo término, correspondiente al volumen de huecos generado por la explotación del carbón (el deshulle), que se calcula considerando los datos de producción de carbón de cada pozo. Este dato presenta una cierta incertidumbre, puesto que se desconoce la producción de los primeros años de vida de los pozos. El volumen de carbón explotado se pondera con un coeficiente corrector que se ha estimado en un 40%, ya que se considera que del volumen de carbón deshullado únicamente queda como hueco un 40%, y que el resto se pierde debido al relleno en determinadas capas, o a los hundimientos en otras, según el método de explotación.

El porcentaje en volumen correspondiente al término de hueco por deshulle en cada pozo está comprendido entre un 24% y un 10% del volumen de hueco de galerías, por lo que el error fruto de las incertidumbres anteriores podría ser asumible.

En la Tabla 6-1 se muestran los valores de volumen de huecos calculados para cada pozo del Grupo HUNOSA pertenecientes a la zona objeto de estudio.

Tabla 6-1.- Volumen de huecos para los pozos de la zona objeto de estudio

Pozo Minero	Km de galería	Volumen de huecos de galería m ³	Volumen minado m ³	Volumen total m ³
Tres Amigos	151,26	1.512.620	459.164	1.971.784
Polio	153,43	1.534.292	420.257	1.954.549
Total:	304,69	3.046.912	879.421	3.926.333

6.4. CAUDALES BOMBEADOS

Durante los últimos años se han venido realizando constantes estudios para correlacionar los caudales bombeados por cada uno de los pozos, determinándose que en el caso de bocaminas de montaña el tiempo medio de permanencia del agua de lluvia en las minas está comprendido entre 4 y 10 días, recogándose casi la totalidad del agua de lluvia caída en la superficie abarcada por la explotación (Gutierrez Peinador, 1999).

En el caso de los pozos mineros esta correlación es más variada, estimándose tiempos de retención del agua en la mina de entre 15 y 45 días, en función de las características de cada pozo, el macizo entre la superficie y el área deshullada y otros factores que pueden afectar a la infiltración.

El volumen total desaguado anualmente por los pozos del Grupo HUNOSA con autorización de vertido en la zona objeto de estudio supera en la actualidad los 1,8 millones de metros cúbicos de media, tomando datos de los últimos cinco años. En la Tabla 6-2 y Tabla 6-3 se resumen los caudales aportados por los distintos pozos de la zona de estudio. Para este estudio se han recogido los datos de bombeo del pozo Polio desde el año 2002. Para el caso del Pozo Tres Amigos se dispone de datos de desagüe desde el año 2004, puesto que hasta esa fecha no fue instalado el sistema de bombeo.

Tabla 6-2: Caudales desaguados durante los años 2002-2008 en el Pozo Polio.

POZO POLIO	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002
Enero	84.678	134.352	302.400	264.743		112.627	
Febrero	73.022	87.264	280.800	87.899		164.709	158.358
Marzo	77.253	144.288	259.200	279.893		196.525	207.485
Abril	80.640	19.440	221.184	54.069	189.216	169.754	81.527
Mayo	78.512		205.200	64.886	321.408	134.685	
Junio	79.520	31.104	183.600	88.908	311.040	142.197	217.439
Julio	79.408	108.000	77.760	85.968	212.535	160.039	
Agosto	84.560		64.800	57.672	186.624	112.830	366.116
Septiembre			25.920	62.597	238.464	86.098	
Octubre			46.310	90.720	109.588	133.717	245.510
Noviembre		28.000	160.272	92.016	130.216	87.083	
Diciembre	23.968	79.296	19.872	94.608	141.225	98.634	327.707
TOTAL	661.560	631.744	1.847.318	1.323.979	1.840.316	1.598.898	1.604.142

Tabla 6-3.- Caudales desaguados durante los años 2004-2008 en el Pozo Tres Amigos.

POZO TRES AMIGOS	2008	2007	2006	2005	2004
Enero	31.513	15.552	72.576	99.706	
Febrero	18.562	20.736	70.848	107.568	
Marzo	25.667	33.264	69.120	206.280	
Abril	79.776	32.352	29.376	180.112	21.582
Mayo	92.160	28.320	25.920	132.036	35.392
Junio	102.672	22.560	24.192	86.794	10.258
Julio	102.096	19.968	24.192	56.707	31.793
Agosto	1.440	18.624	23.328	29.146	28.344
Septiembre		19.008	43.200	25.344	23.990
Octubre	82.944	21.216	65.232	123.552	21.582
Noviembre	94.752	19.200	14.544	133.056	35.392
Diciembre	90.432	16.704	39.744	142.560	32.736
TOTAL	722.013	267.504	502.272	1.322.861	241.069

Las conclusiones obtenidas tras el tratamiento de los datos aportados son las siguientes:

- En los cálculos de los caudales desaguados se aprecia como los meses de marzo, mayo y junio son especialmente significativos en cuanto al volumen total desaguado, correspondiéndose con el volumen de precipitaciones caídas durante estos meses.

- No es posible calcular con certeza el caudal mínimo anual del Pozo Polio, pero el caudal punta que es necesario desaguar para mantener el nivel se estima entorno a los 300.000 m³/mes.

- El caudal medio aportado por el Pozo Polio al cauce del río San Juan se estima del orden de 140.000 m³ al mes.

- El caudal medio aportado por el Pozo Tres Amigos al cauce del río San Juan se estima del orden de 50.000 m³ al mes.

7. MARCO GEOLÓGICO

Desde el punto de vista geológico, la Cuenca Carbonífera Central (CCC) es una de las regiones definidas por Julivert (1967), situada en la Zona Cantábrica dentro del Macizo Varisco (Lotze, 1945) (Figura 7-1). Constituye una cuenca de tipo sinorogénico formada durante la Orogenia Hercínica y afectada por varias fases de deformación que han originado una estructura fuertemente plegada y fracturada (Marcos y Pulgar, 1982).

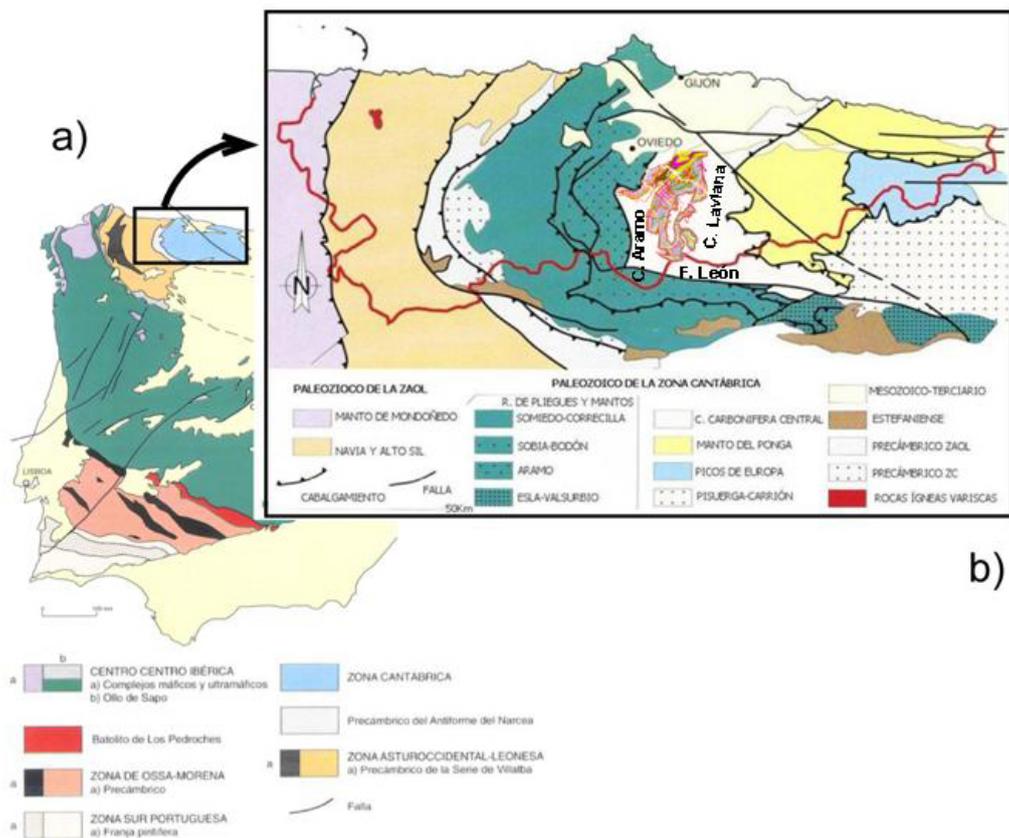


Figura 7-1.- a) Zonación geológica de la Península Ibérica (Bastida y Aller, 1995). b) Unidades geológicas de Asturias (Bastida y Aller, 1995), ubicación de los límites de la CCC y representación de la extensión superficial del 'Carbonífero Productivo' (datos del Grupo HUNOSA)

Los límites occidental y meridional los constituyen el cabalgamiento del Aramo y la Falla de León, respectivamente. Estas estructuras separan a la CCC de la Región de Pliegues y Mantos. Hacia el este, el cabalgamiento de Laviana actúa como límite con la Región de Mantos, mientras que al norte, la Cobertera Mesozoico-Terciaria oculta los materiales de la CCC, cuya prolongación es visible, no obstante, gracias a la existencia de algunos afloramientos aislados en la parte septentrional de Asturias.

De acuerdo con las características litoestratigráficas y estructurales, la CCC se ha dividido en tres sectores: Riosa-Olloniego, La Justa-Aramil y Caudal-Nalón, separados entre ellas por fallas mayores que coinciden con la orientación de los cabalgamientos hercínicos (Figura 7-2).

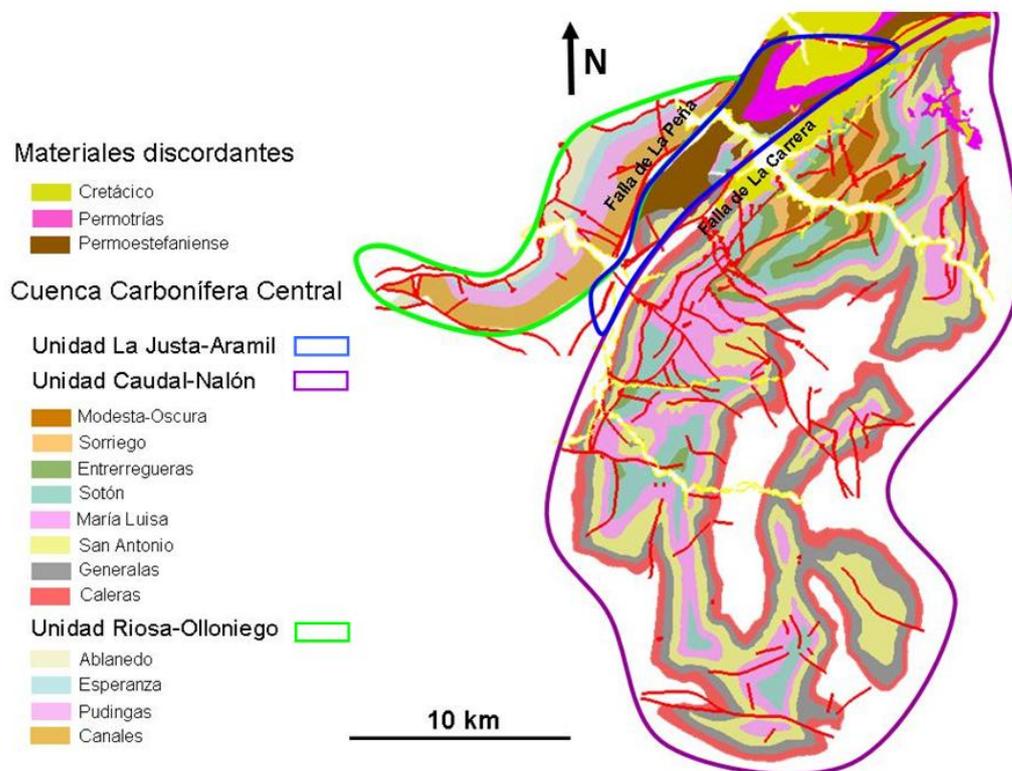


Figura 7-2.- Mapa geológico de superficie donde se muestra las diferentes zonas en las que se subdivide el carbonífero productivo (datos del Grupo HUNOSA)

7.1. ESTRATIGRAFÍA

Los materiales que forman la Cuenca Carbonífera Central son exclusivamente carboníferos, excepto los materiales cámbricos y ordovícicos que forman la base del cabalgamiento de Laviana en la parte más oriental de la misma. Los materiales carboníferos representan un espesor de sedimentos de aproximadamente 6000 metros con edades que van desde el Namuriense B al Westfaliense D (Fernández, 1995). La sucesión se ha dividido en dos grandes conjuntos, uno inferior denominado Grupo Lena, caracterizado por contener calizas y escasas y delgadas capas de carbón, y otro superior denominado Grupo Sama, en el que las calizas son escasas y, en cambio, hay abundantes niveles de areniscas, algunos niveles de conglomerados y capas de carbón explotables. Tanto el Grupo Lena como el Grupo Sama han sido divididos en una serie de unidades litoestratigráficas (Figura 7-3), denominadas “paquetes” en terminología minera (García-Loygorri *et al.*, 1971), que de muro a techo son: Fresnedo, Levinco, Llanón, Tendeyón y Caleras (Grupo Lena), y Generalas, San Antonio, María Luisa, Sotón, Enterregueras, Sorriego, Modesta y Oscura (Grupo Sama). En la zona de la Justa-Aramil y Caudal-Nalón el ‘Carbonífero productivo’ (García-Loygorri, 1974) (conjunto de paquetes sujetos a explotación minera) incluye el paquete superior del Grupo Lena (Paquete Caleras) y todos los paquetes del Grupo Sama. En la zona Riosa-Olloniego se diferencian únicamente cuatro paquetes mineros, que de muro a techo son: Canales, Pudingas, Esperanza y Ablanedo. Actualmente únicamente se explota el Paquete Canales.

El medio deposicional ha sido interpretado como un delta (Sánchez de la Torre *et al.*, 1981, Colmenero y Barba, 1985) o como un ambiente de isla barrera lagoon (Leyva y Sáenz de Santa María, 1983, Luque *et al.*, 1983, Sáenz de Santa María *et al.*, 1983). Según estos últimos autores, la secuencia está formada por ciclos fundamentalmente regresivos que constituyen una gran megasecuencia general que contiene ambientes cada vez más someros. El ciclo sedimentario característico (Figura 7-4) comienza con facies de plataforma (lutitas, calizas y margas), sobre las que se

desarrollan facies de barras arenosas (areniscas) que evolucionan hacia techo a facies de lagoon (lutitas fundamentalmente), finalizando el ciclo con el desarrollo de una capa de carbón.

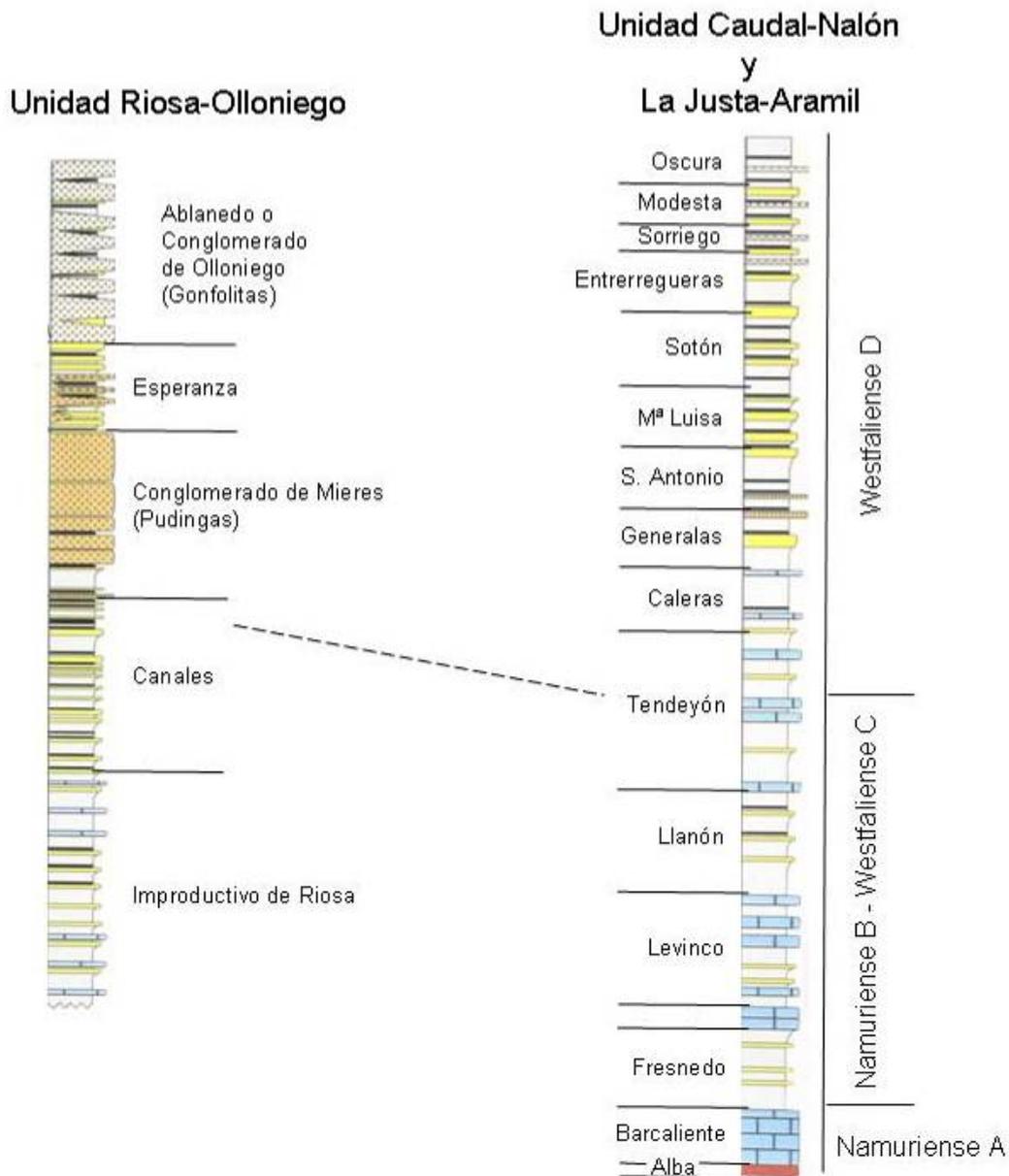


Figura 7-3.- Columnas estratigráficas generales y correlación de distintas unidades de la Cuenca Carbonífera Central (Fernández, 1995)

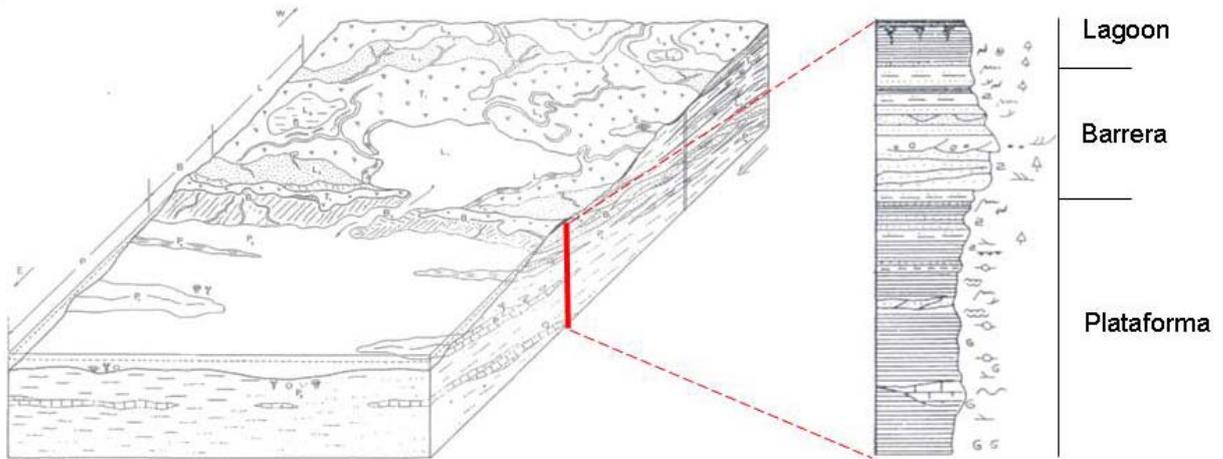


Figura 7-4.- Esquema del ambiente deposicional de la Cuenca Carbonífera Central durante el Westfaliense D y ciclo característico (Sáenz de Santa María *et al.*, 1983)

De acuerdo con Sáenz de Santa María *et al.* (1983), sobre los sedimentos de la plataforma carbonatada y plataforma mixta, correspondientes a los niveles improductivos (Fm. Barcaliente, Fm. Vadeteja, Paquete Fresnedo, Paquete Levinco, Paquete Llanón y Paquete Tendeyón), empiezan a depositarse materiales de isla barrera lagoon, tal y como comienza a observarse a partir de los niveles superiores del Paquete Tendeyón y especialmente a partir del Paquete Caleras. Hasta el Paquete San Antonio incluido, los niveles de lagoon son escasos, existiendo un predominio de los ambientes de mar abierto e isla barrera, lo que hace que las capas de carbón no sean muy abundantes. Este ambiente deposicional se ve interrumpido por la invasión de niveles de conglomerados silíceos (Pudingas de Generalas y San Antonio) originados por abanicos aluviales procedentes del NO. Estos niveles no son continuos en toda la cuenca, sino que desaparecen hacia el E y S de la misma. Los eventos de conglomerados dan paso al desarrollo de los ciclos normales descritos anteriormente. A partir de los potentes sedimentos de barra arenosa que constituyen la Arenisca de la Voz (techo del Paquete San Antonio), comienzan a desarrollarse con más intensidad los ambientes de lagoon y por tanto la presencia de carbón (Paquetes María Luisa, Sotón y Entrerregueras). En la parte basal del Paquete Sorriego existe una fase

transgresiva que da lugar a la aparición de sedimentos de plataforma lutítica, próxima a la costa e isla barrera, que rápidamente evolucionan a sedimentos de lagoon con episodios de deposición de carbón (parte superior del Paquete Sorriego y Paquete Modesta-Oscura). Estas variaciones finales en la sedimentación se ven acompañadas por la llegada de conglomerados calcáreos (gonfolitas) con distribución muy irregular, que reflejan una nueva fase de inestabilidad tectónica del continente.

En la Unidad de Riosa-Olloniego, la secuencia es distinta. Por encima del Grupo Lena, que en la zona se denomina Improductivo de Riosa, se diferencian los paquetes Canales, Pudingas, Esperanza y Ablanado (Figura 7-3). Sedimentológicamente la zona está caracterizada por la presencia de dos potentes niveles de conglomerados que contienen escasas capas de carbón, uno de ellos siliciclástico (Paquete Pudingas, también denominado Conglomerado de Mieres) y otro carbonatado (Paquete Ablanado, también Conglomerado de Olloniego). Por el contrario, los paquetes Canales y Esperanza contienen mayoritariamente lutitas, areniscas y capas de carbón, estructuradas en ciclos similares a los descritos anteriormente.

La datación de los paquetes de esta unidad ha sido determinada basándose en datos paleobotánicos (Jongmans y Wagner, 1957; Caride y García-Loygorri, 1968; Wagner, 1971). De acuerdo con estos autores, el Paquete Canales sería de edad Westfaliense C, si bien su parte superior, así como el resto de los paquetes, ya pertenecen al Westfaliense D.

El rango del carbón presente en la Cuenca Carbonífera Central oscila entre bituminoso de alto contenido en volátiles y antracita, con reflectancias de la vitrinita que varían entre 0.5-2.5 % Ro (Piedad-Sánchez *et al.*, 2004a). El rango del carbón se incrementa hacia el sur. Este aumento no puede ser explicado en términos de evolución orgánica producida únicamente por enterramiento y actuación del gradiente geotérmico normal, sino que debe de existir un segundo evento térmico que origine

esta variación. Piedad-Sánchez *et al.* (2004b) sugieren la presencia en la zona sur de un plutón granítico intruido en el Westfaliense D tardío.

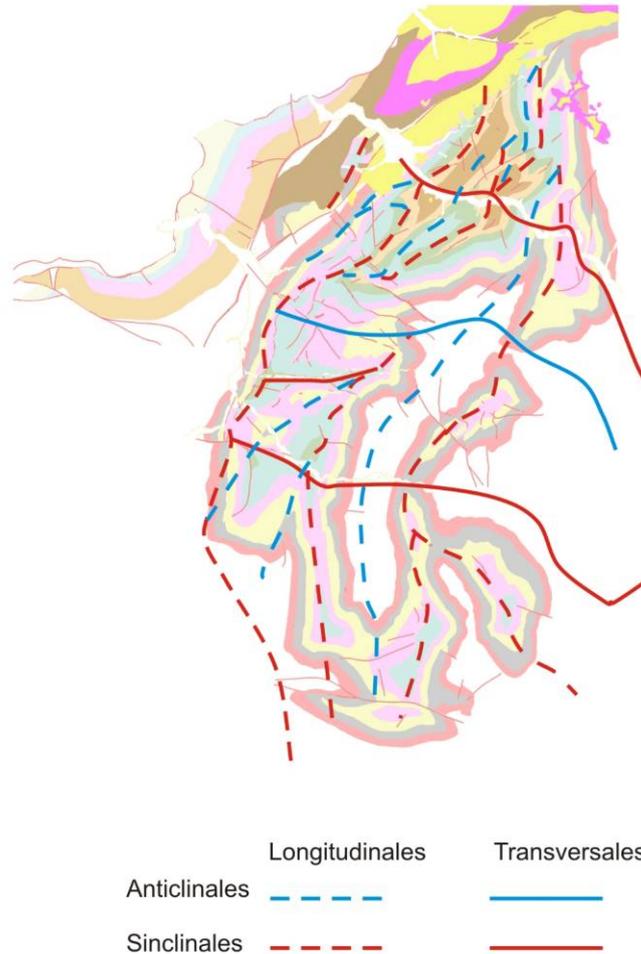


Figura 7-5.- Pliegues mayores longitudinales y radiales de la Cuenca Carbonífera Central (datos del Grupo HUNOSA). La leyenda de los paquetes mineros es la misma que en la Figura 7-2

El carbón de la Cuenca Carbonífera Central es rico en vitrinita, tiene bajo contenido en azufre y variable de cenizas.

El Grupo HUNOSA explota principalmente el ‘Carbonífero Productivo’, el cual tiene un espesor de unos 2.800 m, con más de 60 capas de carbón de potencias entre 0,5 y 1,5 m, y una extensión de unos 500 km², siendo la mayor cuenca carbonífera de España.

7.2. TECTÓNICA

En líneas generales, la Cuenca Carbonífera Central representa un gran sinforme en cuyo interior existe una compleja estructura de pliegues y fallas. La Cuenca muestra en superficie una morfología en arco con una dirección NE-SO en el sector norte que gradualmente se orienta N-S hacia la zona central y NO-SE hacia el sur.

Dentro del ‘Carbonífero Productivo’ de la CCC existen dos fallas mayores que coinciden con la orientación de los cabalgamientos hercínicos: la Falla de La Carrera y la Falla de La Peña, (Figura 7-2), y que lo subdividen en tres sectores: Unidad de Riosa-Olloniego, Unidad de La Justa-Aramil y Unidad de Caudal-Nalón. Existen además dos sistemas de pliegues, uno paralelo a los cabalgamientos hercínicos (pliegues longitudinales) y otro aproximadamente perpendicular a los mismos (pliegues transversales o radiales) originando figuras de interferencia tipo I de Ramsay (Ramsay, 1967). La Unidad de Riosa-Olloniego está formada por una sucesión monoclinial inclinada en general hacia el NE y está limitada por el Cabalgamiento del Aramo al E y la Falla de la Peña al O. La Unidad de La Justa-Aramil representa un sinclinal donde afloran los paquetes inferiores del ‘Carbonífero Productivo’, la Falla de la Carrera (al este) actúa como límite con la Unidad de Caudal-Nalón. A grandes rasgos, esta última unidad, está constituida por varios sinclinales longitudinales afectados por dos grandes sinclinales transversales (Figura 7-5).

La mayoría de las fracturas son hercínicas y por tanto asociadas al sistema de esfuerzos que originaron los pliegues y los cabalgamientos durante la Orogenia Hercínica. No obstante, aunque con un menor desarrollo, existen también estructuras que se relacionan con una etapa extensional post-Hercínica o con el evento Alpino.

Finalmente, en la parte sur de la CCC, existe un incipiente metamorfismo de bajo grado posiblemente relacionado con intrusiones profundas que se han comentado en el apartado de estratigrafía. La presencia de fallas y otras estructuras también pudieron haber facilitado la circulación de los fluidos (Aller y Brime, 1983; Piedad-Sánchez *et al.*, 2004b).

8. ESTUDIO CLIMÁTICO

8.1. INTRODUCCIÓN

El clima general en Asturias es oceánico, con precipitaciones abundantes repartidas a lo largo del año y temperaturas suaves tanto en invierno como en verano. Debido a lo abrupto de la geografía asturiana hay infinidad de microclimas, pero se distinguen cuatro "microclimas principales": la franja climática del litoral, muy influenciada por el mar, otra franja climática en el Suroeste del Principado, con un clima más continentalizado, la franja central que aunque oceánico, no está tan influenciada por el mar como la litoral y el Clima de Montaña en todas las regiones de la Cordillera Cantábrica, con importantes nevadas, que en cotas no muy altas, pueden comenzar en Octubre y prorrogarse hasta Mayo, e incluso en cotas inferiores a los 2.000 metros en los meses de verano.

El clima de una zona puede descomponerse en una serie de elementos, cuyo conjunto describe las condiciones ambientales generales. Aunque el parámetro más característico de las propiedades dinámicas de la atmósfera es la presión, desde el punto de vista climático las diferenciaciones suelen establecerse en función de las precipitaciones y de las temperaturas, que constituyen los factores más importantes a la hora de definir las condiciones ambientales físicas de un lugar.

8.1.1. PRECIPITACIONES

La zona cantábrica, aunque no uniforme, se define por precipitaciones abundantes, nubosidad persistente y, por tanto, escasa aridez. Son tres factores generales los que condicionan la totalidad de los parámetros del clima oceánico ibérico: la situación latitudinal, la influencia del mar y la topografía. La cornisa cantábrica se encuentra en plena zona de circulación de las borrascas, que la afectan

especialmente en los meses invernales, en los que los vientos de componente Oeste, al llegar a la costa cargados de humedad, aportan abundantes precipitaciones. Los meses estivales son períodos anticiclónicos y de vientos del Nordeste, de origen continental y escasa humedad, lo que se traduce en un descenso generalizado de precipitaciones. Esta situación general explica la característica esencial de la curva de precipitaciones en la cornisa cantábrica: máximos invernales y un sensible descenso en la época estival. Las lluvias durante la estación fría llegan a saturar el suelo y a partir de ese punto cualquier nuevo aporte se pierde por escorrentía y no puede ser aprovechado. En el verano, sin embargo, la demanda de agua es mucho mayor debido al calor, por lo que las posibles lluvias adquieren una enorme importancia y actúan como un factor limitante. La cordillera cantábrica constituye un obstáculo orográfico que actúa como una barrera ante los movimientos de las capas atmosféricas superficiales. Las procedentes del Norte y Noroeste se la encuentran frontalmente, lo que origina inicialmente un persistente estancamiento de las masas nubosas contra ella. La cornisa cantábrica constituye, debido a este motivo, la región con menos insolación de la Península. De acuerdo con los datos recogidos en los más de 160 pluviómetros repartidos por la región, las lluvias anuales en nuestra región varían desde los 900 hasta más de 2000 mm ó L/m².

Existe una estrecha relación entre la precipitación y la altitud, de forma que los mínimos se registran en la costa y los máximos en las zonas más elevadas de la montaña. Este es el rasgo más importante del reparto de las lluvias en Asturias, cuyo origen está en un fenómeno denominado “efecto de ladera”. Éste se produce cuando una masa de aire cargada de humedad se ve obligada a ascender al encontrarse con una barrera montañosa. Al aumentar la altitud, la presión se hace progresivamente menor y se produce un descenso de la temperatura generalizado para toda la masa de aire. Si la temperatura desciende por debajo del punto de rocío, el vapor de agua se condensa y se forman las nubes. Si la ascensión forzada y el enfriamiento continúan se desencadenan las lluvias. El gradiente de precipitaciones en relación con la altitud es variable según las zonas, pudiendo calcularse una media para Asturias de unos 100

L/m² para un incremento de 100 m de altitud. Sin embargo, existe una gran variabilidad, que complica el trazado de las “isoyetas” (curvas de igual precipitación), ya que los gradientes sólo son válidos localmente y el relieve asturiano es especialmente complejo. Las precipitaciones máximas en Asturias son difíciles de precisar entre otras cosas por la ausencia de estaciones en las zonas más altas de la montaña, donde la precipitación desciende, tanto por haber desaparecido una buena parte del contenido en agua de la masa de aire, como porque las cumbres ya no constituyen un obstáculo neto y las masas nubosas tienden a rodearlas más que a superarlas.

8.1.2. TEMPERATURAS

El régimen térmico de una zona depende sobre todo de la radiación solar que recibe. La latitud de Asturias, cercana a los 45° N implica una fuerte estacionalidad en la radiación, ya que la duración de los días, así como de las horas de sol recibidas, es muy variable. Cabría esperar que las temperaturas en Asturias siguiesen una pauta similar a la radiación. Sin embargo, la presencia del mar amortigua las fluctuaciones de temperatura de tal forma que, probablemente, la costa cantábrica tiene el régimen térmico más templado de Europa. Asturias, por tanto, tiene un clima típicamente oceánico, donde los contrastes de temperaturas siempre son moderados, especialmente en la costa. Hacia el interior los contrastes aumentan, tanto en los valles interiores como en la montaña, pero sin llegar nunca a los extremos observables en las localidades continentales de la montaña leonesa o de la meseta. Se observa con las temperaturas un efecto similar, aunque invertido, al de las precipitaciones: existe una fuerte relación con la altitud, de forma, que la temperatura disminuye unos 0,5°C por cada 100 m de elevación. Este gradiente se manifiesta de forma bastante regular en la región y, junto con la influencia del mar, explica una buena parte de la distribución regional de las temperaturas.

8.1.3. BALANCE HÍDRICO

Las lluvias constituyen el único aporte de agua de importancia para la vegetación. Una fracción importante de este volumen de agua es utilizada por las plantas y devuelta a la atmósfera por evaporación y transpiración. Ambos procesos se denominan conjuntamente como evapotranspiración. Ésta no sólo desempeña un papel en el balance hídrico sino también en las temperaturas, ya que la energía implicada en el proceso es muy alta, consecuencia del alto valor del calor de vaporización del agua.

Se habla de “aridez” cuando la vegetación no dispone de agua suficiente para mantenerse en su situación óptima. Para evaluar estas situaciones suele compararse la disponibilidad de agua con la evapotranspiración potencial (aquella propia de una capa de vegetación en equilibrio con el medio y con una disponibilidad de agua no limitada), estimada mediante fórmulas contrastadas experimentalmente, como la de Thorntwaite.

El clima en Asturias, a pesar de ser lluvioso y moderado en sus temperaturas, presenta regularmente situaciones de aridez, al menos en las estaciones de baja altitud. El déficit hídrico siempre es estival, coincidiendo con la época de menos lluvias y temperaturas más altas y tiene una duración máxima de tres meses (Julio a Septiembre). Finaliza con las lluvias otoñales, que recargan rápidamente la reserva en el suelo, llegando a saturarlo hasta el verano siguiente. Las situaciones de sequía en la costa se deben más bien al menor aporte de precipitaciones, mientras que en los valles interiores se deben a un régimen térmico más severo, con temperaturas máximas elevadas que provocan altos valores de evapotranspiración. En la montaña, la aridez se hace menos frecuente debido al efecto conjunto de la elevación de las precipitaciones y el descenso de las temperaturas (Felicísimo, 1992).

8.2. APLICACIÓN A LA ZONA DE ESTUDIO

Para el estudio climático, en primer lugar, se realizó una selección de las estaciones termopluviométricas incluidas en la red controlada por el Instituto nacional de Meteorología (INM), dentro un entorno amplio de la zona de estudio (cuenca del río Caudal). Concretamente, tras calcular las coordenadas UTM de cada estación, fue seleccionada el área limitada por las coordenadas:

X: de 254713,964 a 296796,330

Y: de 4762086,325 a 4804181,141

Esta área corresponde aproximadamente a la cuadrícula representada en la Figura 8-1 y el número de estaciones incluidas en la misma es de 48, tal y como se recoge en la Tabla 8-1.



Figura 8-1: Área total considerada para la petición de datos climáticos al INM

La solicitud de los datos meteorológicos fue tramitada dentro del apartado de prestaciones para ‘Proyectos de investigación no lucrativos realizados por organismos de investigación oficialmente reconocidos’, en este caso, la Universidad de Oviedo y aprobada por la Subsecretaría de Medio Ambiente en Mayo de 2007, comprometiéndose los solicitantes a citar la fuente de tales prestaciones en cualquier trabajo o publicación derivados del uso de las mismas, así como a remitir al INM dicha(s) publicación(es) si existieran.

Antes de realizar la petición se comprobó la base de datos, correspondiente a peticiones de prestaciones anteriores al INM que obraba en poder del Grupo HUNOSA y la Universidad de Oviedo, por lo que en alguna de las estaciones sólo fue necesario actualizar dicha base de datos.

En la mayoría de las estaciones se solicitaron variables mensuales de precipitación y temperatura –cuando fuese posible-, excepto en cuatro de ellas (La Nava de Langreo, Oviedo ‘El Cristo’, Pumardongo de Mieres y Santa Cruz de Mieres), en las que fue posible obtener datos diarios. En todos los casos se solicitaron los datos completos durante todo el periodo de funcionamiento de la estación –si ésta ya no estaba activa- y hasta la actualidad en aquellas estaciones en funcionamiento, que en el momento de la petición quedó restringido a Abril de 2007. Además, se solicitó que los datos de las estaciones fuesen facilitados si al criterio del responsable de otorgar la prestación, podían considerarse como fiables y siempre que el periodo de registro superase al menos 4 años.

Con estos condicionantes, los datos correspondientes a 16 de las estaciones solicitadas no fueron facilitados (aparecen sombreadas en la Tabla 8-1), quedando la base de datos limitada entonces a los correspondientes a 32 estaciones. El periodo de funcionamiento de una de ellas, denominada Lada ‘Grupo Escolar’, es de 1951 a 1965, no coincidente con el de ninguna otra estación -y por tanto no correlacionable-, por lo que sus datos no fueron considerados en el estudio que se describirá a

continuación. La ubicación de las 31 estaciones restantes, así como sus características y periodo del que se dispone información, se muestran, respectivamente en la Tabla 8-1 y la Figura 8-2. Los datos facilitados fueron tratados y archivados en un idéntico formato para cada una de las estaciones.

Tabla 8-1: Estaciones pluviométricas y termoplumiométricas incluidas en el área seleccionada para petición de datos climáticos. Estos no fueron facilitados en el caso de las estaciones sombreadas

	C-IND	NOMBRE	TIPO	CUEN.PAR.	LONGITUD	LATITUD	X UTM	Y UTM	ALTITUD	1/50000	1/200000	FUNC.
1	1 221D	PAJARES-VALGRANDE	A	153	05-46-42W	42-58-37	273441,162	4762086,325	1480	103	14	S
2	1 220O	LENA BOCA N. NEGRON	TP	153	05-49-57W	42-58-40	269027,014	4762326,437	1162	103	14	N
3	1 222O	LENA BOCA N PANDO	TP	154	05-49-07W	43-00-40	270283,925	4765990,368	1040	78	14	N
4	1 221A	PAJARES 'G.C.'	P	153	05-46-22W	43-01-00	274039,923	4766482,938	1000	78	14	S
5	1 221	PAJARES	P	153	05-46-25W	43-01-00	273972,009	4766485,182	1000	78	14	N
6	1 221E	EL NOCEDO DE LENA	P	153	05-47-32W	43-01-05	272460,395	4766689,732	900	78	14	N
7	1 222E	TUIZA DE ARRIBA	P	154	05-55-17W	43-01-40	261971,507	4768127,875	1240	77	13	N
8	1 223E	ESPINEDO	TP	154	05-49-50W	43-03-50	269508,193	4771884,733	540	78	14	N
9	1 225	LA PARAYA 'C.E.'	P	156	05-34-27W	43-04-20	290415,338	4772137,339	640	78	14	N
10	1 222U	SOTIELLO DE LENA	P	154	05-49-47W	43-05-10	269659,370	4774350,497	420	78	14	N
11	1 223	CAMPOMANES 'G.C.'	P	154	05-49-07W	43-06-15	270631,321	4776325,315	380	78	14	N
12	1 222	LINARES DE LENA	P	153	05-46-17W	43-06-30	274489,612	4776659,872	920	78	13	N
13	1 227	COLLANZO DE ALLER 'G.C.'	P	158	05-33-52W	43-07-25	291381,594	4777820,390	530	78	14	N
14	1 236E	RICABO DE QUIROS	P	167	05-58-37W	43-06-50	257784,326	4777850,800	680	77	13	N
15	1 223O	VEGA DEL REY DE LENA	P	155	05-48-57W	43-07-40	270945,534	4778940,034	340	78	14	N
16	1 227I	ALLER 'COTO BELLO'	P	158	05-38-17W	43-08-10	285436,757	4779394,647	1300	78	14	N
17	1 223U	TABLADE DE LENA	TP	155	05-52-47W	43-08-30	265801,246	4780659,328	640	77	13	S
18	1 228	NEMBRA	P	159	05-42-37W	43-09-00	279612,292	4781124,784	380	78	14	N
19	1 237O	VILLANUEVA DE TEVERGA	TP	168	05-58-27W	43-09-00	258152,813	4781853,423	660	77	13	N
20	1 236I	LLANUCES	TP	167	05-55-27W	43-09-20	262240,401	4782327,184	860	77	13	N
21	1 224	POLA DE LENA	P	155	05-49-47W	43-09-30	269930,384	4782371,724	317	78	14	N
22	1 236O	BARZANA DE QUIROS 'G.C.'	P	167	05-58-17W	43-09-25	258406,087	4782616,682	466	77	13	N
23	1 227E	SERRAPIO	P	158	05-37-57W	43-10-00	285995,347	4782773,999	460	78	14	N
24	1 229	MOREDA	TP	160	05-44-27W	43-10-00	277188,142	4783056,736	300	53	14	N
25	1 229U	SANTA CRUZ DE MIERES C.T.	TP	160	05-46-17W	43-11-20	274785,801	4785606,628	280	53	14	S
26	1 237	LAS AGUERAS DE QUIROS	P	167	06-00-07W	43-11-50	256082,091	4787178,801	340	52	13	N
27	1 231	SAN ANDRES DE MIERES	TP	162	05-42-47W	43-12-50	279616,505	4788227,814	340	53	14	N
28	1 218D	MUNERA	TP	150	05-31-40W	43-14-08	294740,154	4790162,518	318			S
29	1 218	POLA DE LAVIANA 'G.C.'	P	150	05-33-47W	43-14-45	291910,424	4791391,239	295	53	4	S
30	1 232	MIERES	TP	163	05-46-37W	43-14-40	274539,251	4791791,836	220	53	14	N
31	1 234	LA FOZ DE MORCIN	P	165	05-52-17W	43-15-00	266892,095	4792668,035	260	52	13	N
32	1 239I	PROAZA	TP	169	06-01-17W	43-15-00	254713,964	4793097,512	195	52	13	S
33	1 233	MIERES 'MORGAO'	P	164	05-46-27W	43-15-30	274816,007	4793326,911	290	53	14	N
34	1 218V	BLIMEA-EL PARQUE	TP	150	05-35-17W	43-16-40	289990,541	4795001,667	260	53	4	N
35	1 234P	PUMARDONGO DE MIERES	P	165	05-49-07W	43-16-30	271270,659	4795298,762	180	53	14	N
36	1 234R	PARTEAYER	P	165	05-52-37W	43-16-55	266563,259	4796231,479	146	52	13	N
37	1 234O	EL PADRUN DE MIERES	P	165	05-48-37W	43-17-10	271988,470	4796510,031	380	53	14	N
38	1 219I	SAMA DE LANGREO 'G.C.'	P	152	05-41-02W	43-17-40	282273,235	4797098,193	214	53	4	N
39	1 220	LADA 'GRUPO ESCOLAR'	P	152	05-42-27W	43-18-10	280387,747	4798085,582	210	53	4	N
40	1 220A	LADA 'QCF'	TP	152	05-42-27W	43-18-10	280387,747	4798085,582	200	53	4	N
41	1 195I	MELENDREROS	P	143	05-31-57W	43-18-40	294611,102	4798565,607	600	53	4	N
42	1 235	SOTO DE RIBERA	TP	165	05-52-27W	43-18-40	266900,195	4799463,141	127	52	13	S
43	1 219U	LA NAVA DE LANGREO	TP	152	05-40-07W	43-19-30	283621,179	4800452,118	350	53	4	N
44	1 196	NAVA DE NAVA	P	143	05-31-57W	43-20-40	294723,458	4802267,761	245	29	4	N
45	1 235U	LATORES	P	166	05-52-47W	43-20-15	266550,766	4802409,594	254	28	3	N
46	1 196A	NAVA DE NAVA 'G.C.'	P	143	05-30-27W	43-21-30	296796,330	4803749,111	245	30	4	N
47	1 240	TRUBIA DE OVIEDO	P	169	05-59-17W	43-20-50	257806,778	4803798,331	97	28	3	N
48	1 249I	OVIEDO 'EL CRISTO'	CPE	173	05-52-24W	43-21-13	267130,364	4804181,141	336	28	4	S

La Organización meteorológica Mundial recomienda la existencia de un pluviómetro cada 250 km² en zonas de topografía suave. Este no es exactamente el caso de la zona de estudio pero, teniendo en cuenta el número de estaciones

consideradas para un área total de unos 1770 km², la densidad de pluviómetros es de uno cada 37 km². Por otra parte, dada la complejidad que entraña extender el estudio hacia la Cordillera Cantábrica, lo cual se aleja de la zona de estudio, se ha preferido confeccionar los mapas resultado del estudio limitando el área original por el Sur, a una coordenada Y mínima de 4.768.500,0. El área entonces representada abarca unos 1500 km². La densidad en este caso, considerando además las estaciones no disponibles, es de un pluviómetro cada 48 km².

- 1 Oviedo-Cristo
- 2 Nava de Nava 'G.C.'
- 3 La Nava de Langreo
- 4 Soto de Ribera
- 5 Lada 'OCF'
- 6 Sama de Langreo 'G.C.'
- 7 El Padrín de Mieres
- 8 Parteayer
- 9 Pumarongo de Mieres
- 10 Blimea-El Parque
- 11 Mieres (Morgao)
- 12 Proaza
- 13 La Foz de Morcín
- 14 Pola de Laviana 'G.C.'
- 15 Muñera
- 16 San Andrés de Mieres
- 17 Las Agueras de Quiros
- 18 Sta. Cruz Mieres
- 19 Moreda
- 20 Bárzana de Quiros
- 21 Pola de Lena
- 22 Tablado de Lena
- 23 Aller (Cotobello)
- 24 Ricabo de Quiros
- 25 Collanzo de Aller
- 26 Campomanes 'G.C.'
- 27 Sotiello de Lena
- 28 La Paraya 'C.E.'
- 29 El Nocedo de Lena
- 30 Pajares (G.C.)
- 31 Pajares (Valgrande)

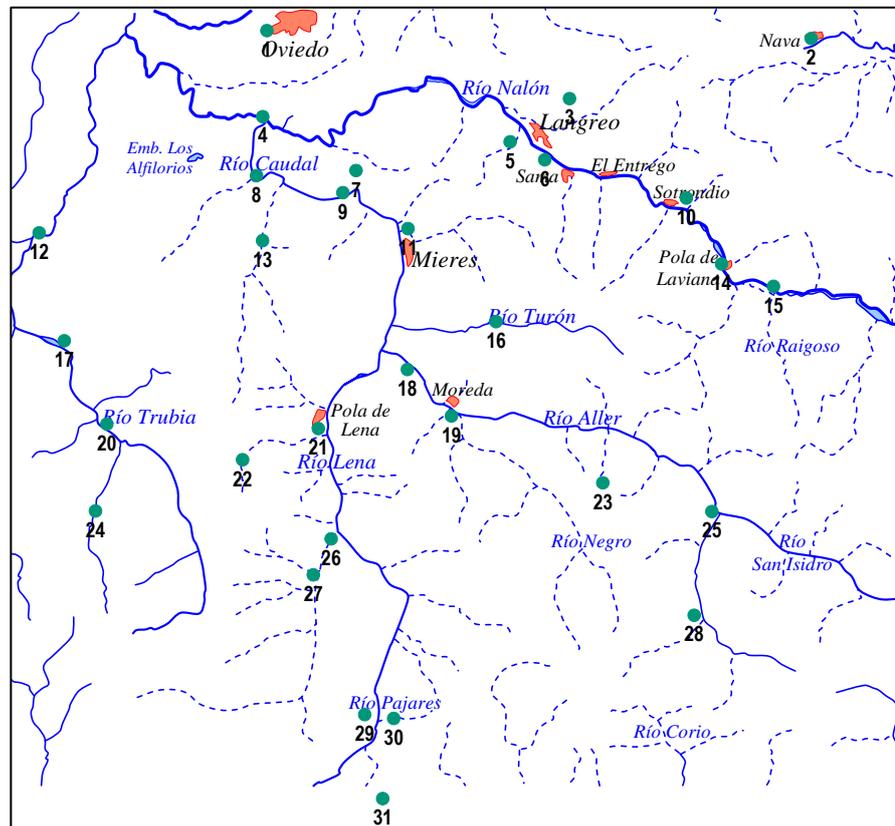


Figura 8-2.- Estaciones consideradas en el estudio climático

Tabla 8-2: Características y periodo de funcionamiento considerado para las estaciones utilizadas en el estudio climático

	C-IND	NOMBRE	TIPO	CUEN.PAR.	LONGITUD	LATITUD	X UTM	Y UTM	ALTITUD	FUNC.	DATOS
1	1 227I	ALLER 'COTO BELLO'	P	158	05-38-17W	43-08-10	285436,8	4779394,6	1300	N	1984-1992
2	1 236O	BARZANA DE QUIROS 'G.C.'	P	167	05-58-17W	43-09-25	258406,1	4782616,7	466	N	1971-1990
3	1 218V	BLIMEA-EL PARQUE	TP	150	05-35-17W	43-16-40	289990,5	4795001,7	260	N	1987-1998
4	1 223	CAMPOMANES 'G.C.'	P	154	05-49-07W	43-06-15	270631,3	4776325,3	380	N	1971-1996
5	1 227	COLLANZO DE ALLER 'G.C.'	P	158	05-33-52W	43-07-25	291381,6	4777820,4	530	N	1971-1988
6	1 221E	EL NOCEDO DE LENA	P	153	05-47-32W	43-01-05	272460,4	4766689,7	900	N	1976-1996
7	1 234O	EL PADRUN DE MIERES	P	165	05-48-37W	43-17-10	271988,5	4796510,0	380	N	1973-1981
8	1 234	LA FOZ DE MORCIN	P	165	05-52-17W	43-15-00	266892,1	4792668,0	260	N	1947-1993
9	1 219U	LA NAVA DE LANGREO	TP	152	05-40-07W	43-19-30	283621,2	4800452,1	350	N	1979-1988 (d)
10	1 225	LA PARAYA 'C.E.'	P	156	05-34-27W	43-04-20	290415,3	4772137,3	640	N	1973-2003
11	1 220	LADA 'GRUPO ESCOLAR'	P	152	05-42-27W	43-18-10	280387,7	4798085,6	210	N	1951-1965
12	1 220A	LADA 'OCF'	TP	152	05-42-27W	43-18-10	280387,7	4798085,6	200	N	1957-1972
13	1 237	LAS AGUERAS DE QUIROS	P	167	06-00-07W	43-11-50	256082,1	4787178,8	340	N	1955-1980
14	1 233	MIERES 'MORGAO'	P	164	05-46-27W	43-15-30	274816,0	4793326,9	290	N	1972-1999
15	1 229	MOREDA	TP	160	05-44-27W	43-10-00	277188,1	4783056,7	300	N	1970-1989
16	1 218D	MUNERA	TP	150	05-31-40W	43-14-08	294740,2	4790162,5	318	S	2001-2007
17	1 196A	NAVA DE NAVA 'G.C.'	P	143	05-30-27W	43-21-30	296796,3	4803749,1	245	N	1971-1994
18	1 249I	OVEDO 'EL CRISTO'	CPE	173	05-52-24W	43-21-13	267130,4	4804181,1	336	S	1972-2007 (d)
19	1 221A	PAJARES 'G.C.'	P	153	05-46-22W	43-01-00	274039,9	4766482,9	1000	S	1971-2007
20	1 221D	PAJARES-VALGRANDE	A	153	05-46-42W	42-58-37	273441,2	4762086,3	1480	S	2000-2007
21	1 234R	PARTEAYER	P	165	05-52-37W	43-16-55	266563,3	4796231,5	146	N	1987-1995
22	1 218	POLA DE LAVIANA 'G.C.'	P	150	05-33-47W	43-14-45	291910,4	4791391,2	295	S	1971-2007
23	1 224	POLA DE LENA	P	155	05-49-47W	43-09-30	269930,4	4782371,7	317	N	1951-1978
24	1 239I	PROAZA	TP	169	06-01-17W	43-15-00	254714,0	4793097,5	195	S	1969-2007
25	1 234P	PUMARDONGO DE MIERES	P	165	05-49-07W	43-16-30	271270,7	4795298,8	180	N	1979-1996 (d)
26	1 236E	RICABO DE QUIROS	P	167	05-58-37W	43-06-50	257784,3	4777850,8	680	N	1970-1979
27	1 219I	SAMA DE LANGREO 'G.C.'	P	152	05-41-02W	43-17-40	282273,2	4797098,2	214	N	1971-2004
28	1 231	SAN ANDRES DE MIERES	TP	162	05-42-47W	43-12-50	279616,5	4788227,8	340	N	1972-1976
29	1 229U	SANTA CRUZ DE MIERES C.T.	TP	160	05-46-17W	43-11-20	274785,8	4785606,6	280	S	1979-2007(d)
30	1 222U	SOTIELLO DE LENA	P	154	05-49-47W	43-05-10	269659,4	4774350,5	420	N	1978-1983
31	1 235	SOTO DE RIBERA	TP	165	05-52-27W	43-18-40	266900,2	4799463,1	127	S	1960-2007
32	1 223U	TABLADO DE LENA	TP	155	05-52-47W	43-08-30	265801,2	4780659,3	640	S	1978-2007

(d) diarios; en otro caso, mensuales

8.3. VALIDACIÓN DE DATOS Y OBTENCIÓN DE SERIES COMPLETAS DE PRECIPITACIÓN

En toda red pluviométrica existen estaciones especialmente cuidadas en lo que se refiere a la fiabilidad de sus datos y suelen denominarse estaciones base. Éstas se utilizan para validar los datos obtenidos en otras estaciones de su entorno, generalmente mediante el método de dobles masas o dobles acumulaciones, comparando la serie pluviométrica de la estación problema con la misma medida en la

estación base (Martínez-Alfaro *et al.*, 2006). Se puede de este modo comprobar si los datos de una determinada estación se pueden considerar como válidos o si existe un error de tipo aleatorio o sistemático, en cuyo caso podría corregirse.

Es frecuente la necesidad de completar los datos correspondientes a la serie en algunas estaciones en las que pueden existir ‘lagunas’ en las medidas, por averías puntuales o causas diversas. El método más habitual de resolver este problema es establecer una correlación lineal entre una estación (problema) y otra (base), de análogas características climáticas, que cuente con los datos correspondientes a las lagunas e la estación problema. La fiabilidad de los datos obtenidos puede medirse fácilmente a partir del coeficiente de correlación entre ambas series. Al no ser la precipitación una variable continua ni espacial ni temporal, no cabe la aplicación de métodos geoestadísticos de interpolación (Martínez-Alfaro *et al.*, 2006).

En este caso, se han tomado como estaciones base las de Oviedo ‘El Cristo’ y Santa Cruz de Mieres, por su prolongado periodo de funcionamiento y la fiabilidad contrastada de sus datos. Los datos del resto de estaciones han sido validadas con los de ambas estaciones, eligiéndose para completar los datos faltantes en las mismas, aquella de las dos estaciones base con la que hubiese un mayor periodo común de datos y un mayor coeficiente de correlación entre los mismos.

En este proceso se han desechado para fases posteriores, aquellas estaciones con un periodo de registro limitado, aquellas cuyos datos no correlacionan bien con los de las estaciones base y, en el caso de las precipitaciones, se han restringido los valores de las estaciones que impidan alcanzar una elevada correlación positiva entre precipitación media y altitud de la estación, de forma que dicho coeficiente de correlación fuese al menos de 0,7.

En este estudio se han utilizado los datos mensuales y en aquellas estaciones con series incompletas de datos, se realizó una recta de regresión con los datos de la

Estación de referencia, para completar la serie. Como ejemplo, se muestra en la Figura 8-3 la correlación de datos de las estaciones de Oviedo ‘El Cristo’ (base) y Soto de Ribera (problema), con 448 y 445 datos, respectivamente, durante el periodo 1970-2006.

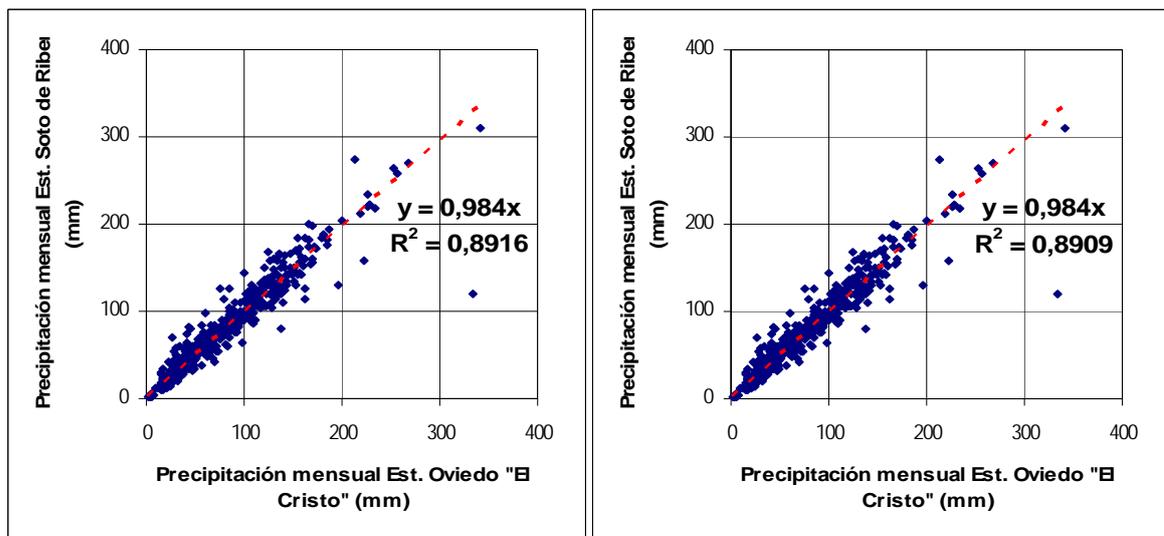


Figura 8-3: Correlación y ecuación de la recta de regresión entre los datos brutos (izda.) y los datos completados (dcha.) de una estación problema y una estación base para una misma serie

Una vez completadas las series de las estaciones seleccionadas, se procedió a calcular las precipitaciones medias mensuales para el periodo considerado, así como anuales (tanto como media de todos los valores anuales, como a partir de la suma de los valores medios mensuales de todo el periodo). Asimismo, se hicieron los cálculos por año natural y por año hidrológico (octubre a septiembre), para el periodo 1970/71 – 2005/06.

Con la serie de datos pluviométricos completa y depurada, éstos se extrapolaron a toda el área de estudio, realizándose una correlación con la altitud, para lo cual se tuvo en cuenta la topografía del terreno. Ello fue realizado digitalizando las curvas de nivel y asignando aproximadamente –y con las salvedades comentadas en el primer apartado - la misma precipitación a puntos de igual cota. La interpolación fue

realizada mediante el programa informático SURFER y posteriormente, la malla obtenida fue depurada una serie de veces hasta obtener una malla coherente de 8100 puntos, cuya representación en forma de isolíneas (Isoyetas), se muestra, para valores medios anuales, en la Figura 8-4. El trazado realizado resulta coherente con el que aparece en publicaciones anteriores (MOPU, 1988, IGME, 1984, Marquínez *et al.*, 2003).

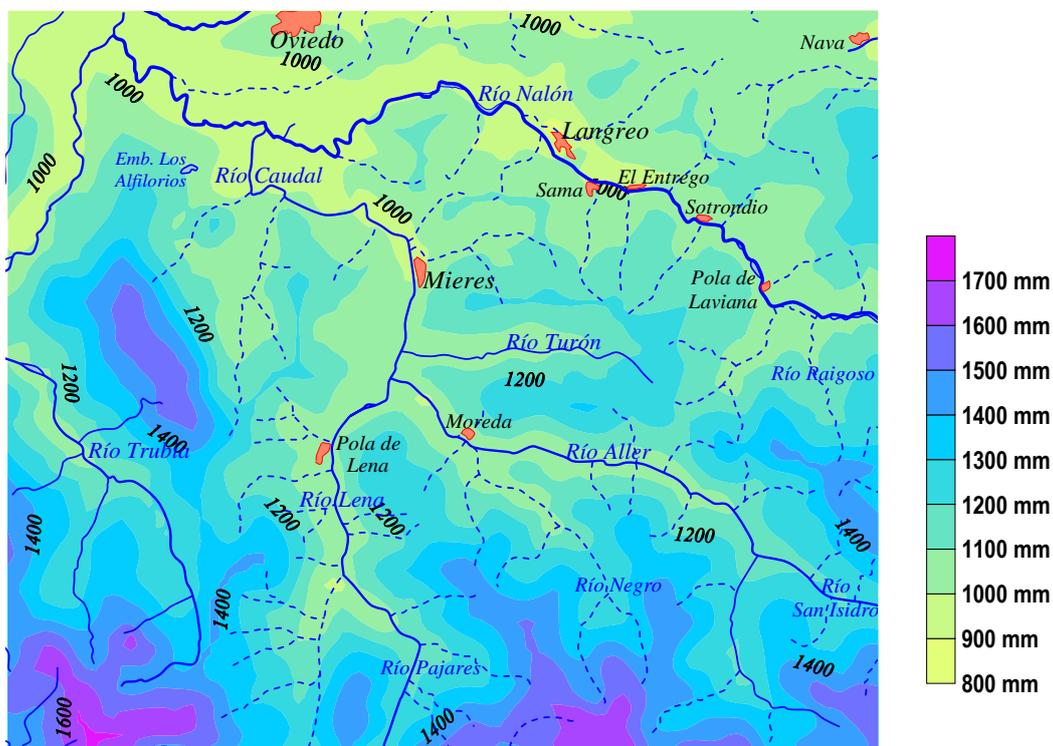


Figura 8-4: Isoyetas medias anuales (período 1970/71 – 2005/06)

Posteriormente, fueron realizados los mapas de isoyetas de año seco y año húmedo (aquellos en los que llueve, respectivamente, un 25% menos y un 25% más que en un año medio). Estos mapas se muestran en la Figura 8-5 y la Figura 8-6.

La anterior metodología para completar datos faltantes fue aplicada análogamente a los datos de temperaturas disponibles, muy inferiores en número a los de precipitaciones.

Con las series completas se realizaron medias mensuales y anuales, así como el cálculo de la evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite. Igualmente, teniendo también en cuenta los datos de precipitación de cada estación, fue calculada la evapotranspiración real y la “lluvia útil” (precipitación menos evapotranspiración real, que dará lugar a escorrentía superficial y subterránea), el balance hídrico, reservas, déficit y superávit en cada estación termoplumiométrica. Este cálculo fue realizado para cada uno de los años hidrológicos del periodo y para cada una de las estaciones, así como utilizando por otra parte, los valores medios mensuales de precipitación y temperatura calculados. Estos datos puntuales fueron extrapolados al área de estudio, al igual que se hiciera con las precipitaciones, teniendo en cuenta la influencia de la altitud, como se explica en el primer apartado.

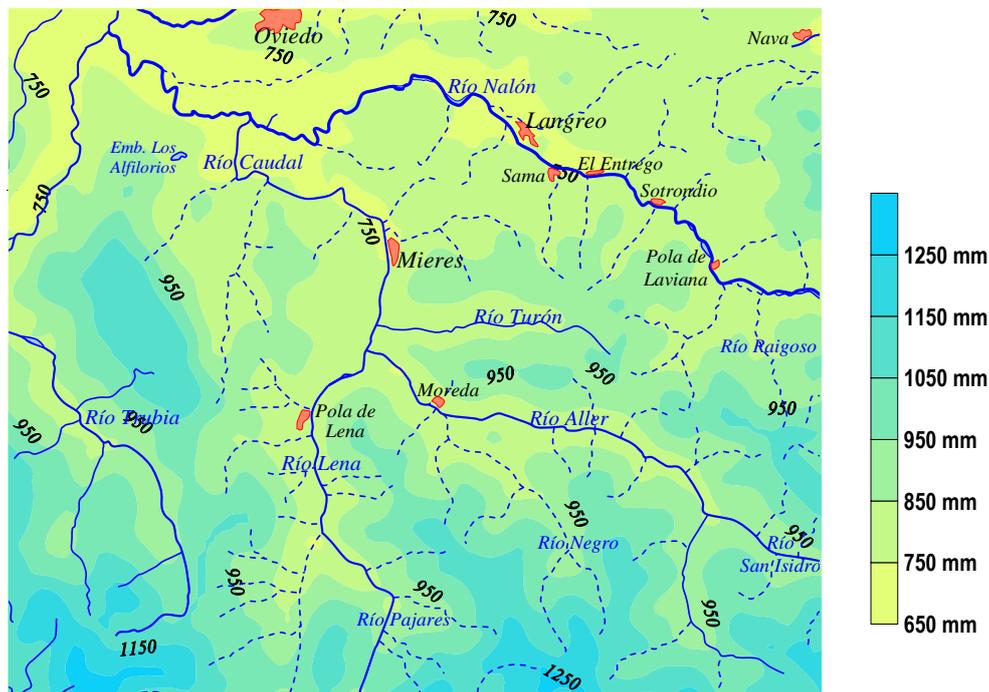


Figura 8-5: Isoyetas del año seco (periodo 1970/71 – 2005/06)

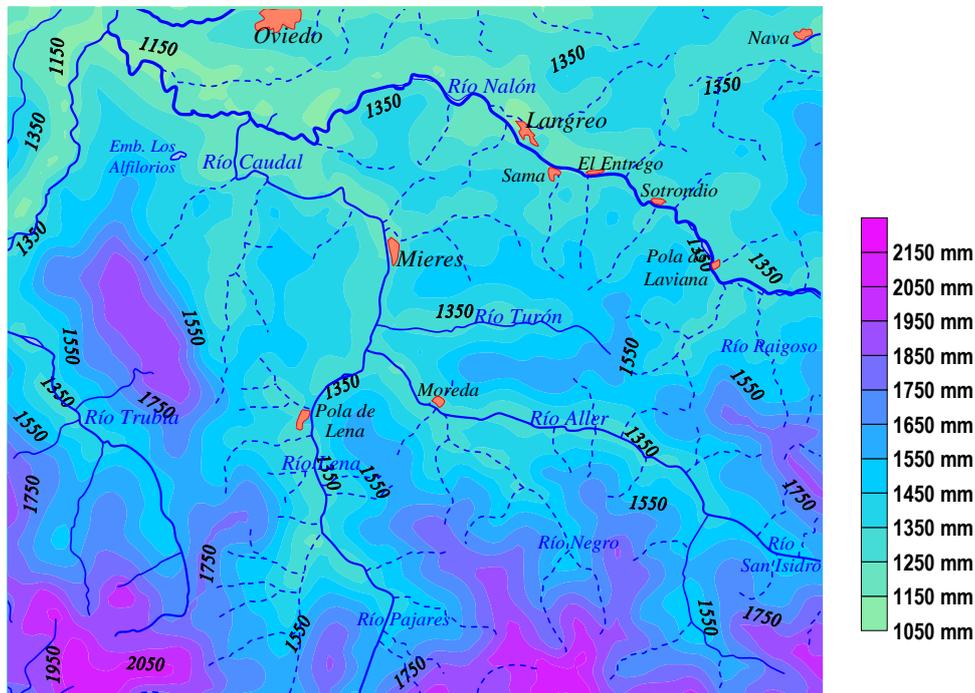


Figura 8-6: Isoyetas del año húmedo (periodo 1970/71 – 2005/06)

Los valores medios mensuales y anuales para un año hidrológico medio, obtenidos para el periodo de funcionamiento de la Estación de Santa Cruz de Mieres, se recogen en la Tabla 8-3.

Tabla 8-3: Valores climatológicos para un año hidrológico medio en la zona de estudio

Estación Santa Cruz de Mieres	LONGITUD	LATITUD	X (UTM)	Y (UTM)	Altitud (m)												
	5°46'17"W	43°11'20"	274785,8	4785606,6	280	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Precipitación (mm)	82,3	94,2	84,5	76,9	74,4	76,4	93,2	89,3	52,7	45,2	48,1	54,6	871,9				
Precipitación año seco (mm)	61,7	70,6	63,4	57,7	55,8	57,3	69,9	67,0	39,5	33,9	36,1	40,9	653,9				
Precipitación año húmedo (mm)	102,9	117,7	105,7	96,1	93,0	95,5	116,5	111,6	65,9	56,5	60,1	68,2	1089,9				
Temperatura media (°C)	14,6	10,7	8,6	8,0	8,5	10,2	11,1	14,0	16,9	19,1	19,5	18,0	13,3				
Evapotranspiración Potencial (mm)	57,5	32,4	23,0	21,5	23,7	38,0	46,1	71,4	93,4	113,0	107,1	83,8	710,9				
Evapotranspiración Real (mm)	57,5	32,4	23,0	21,5	23,7	38,0	46,1	71,4	93,4	104,5	48,1	54,6	614,2				
Precipitación útil (mm)	24,8	61,7	61,5	55,4	50,7	38,4	47,1	17,9	0	0	0	0	257,7				
Reserva (mm)	0	24,8	86,5	100	100	100	100	100	100	59,3	0	0	770,7				
Déficit (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,5	59,0	29,2	96,7				
Superávit (mm)	0	0	48,1	55,4	50,7	38	47	18	0	0	0	0	257,7				

Se han calculado también los valores medios mensuales de evapotranspiración potencial y real, según el método de Thorntwaite, así como el valor de la lluvia útil

correspondiente. Asimismo, se recogen también los valores de la precipitación de un año seco y un año húmedo. Todos estos valores se consideran extrapolables a la zona de estudio.

Se puede observar que la precipitación de un año hidrológico medio es de unos 870 mm, de los cuales, se evapotranspira un 70%, con lo que se tiene una lluvia útil anual de unos 260 mm. Por otra parte, el balance hecho mes a mes, permite estimar que la reserva del suelo está llena 6 meses al año, de Enero a Junio (se ha tomado un valor de 100 mm de reserva útil), mientras que existe déficit en los meses de Julio a Septiembre (únicos meses en los que la evapotranspiración real es inferior a la potencial) y superávit (exceso que generará escorrentía) en el periodo que va de Diciembre a Mayo. Además, la lluvia útil es inexistente en los meses de verano. Estos resultados se representan gráficamente en la Figura 8-7.

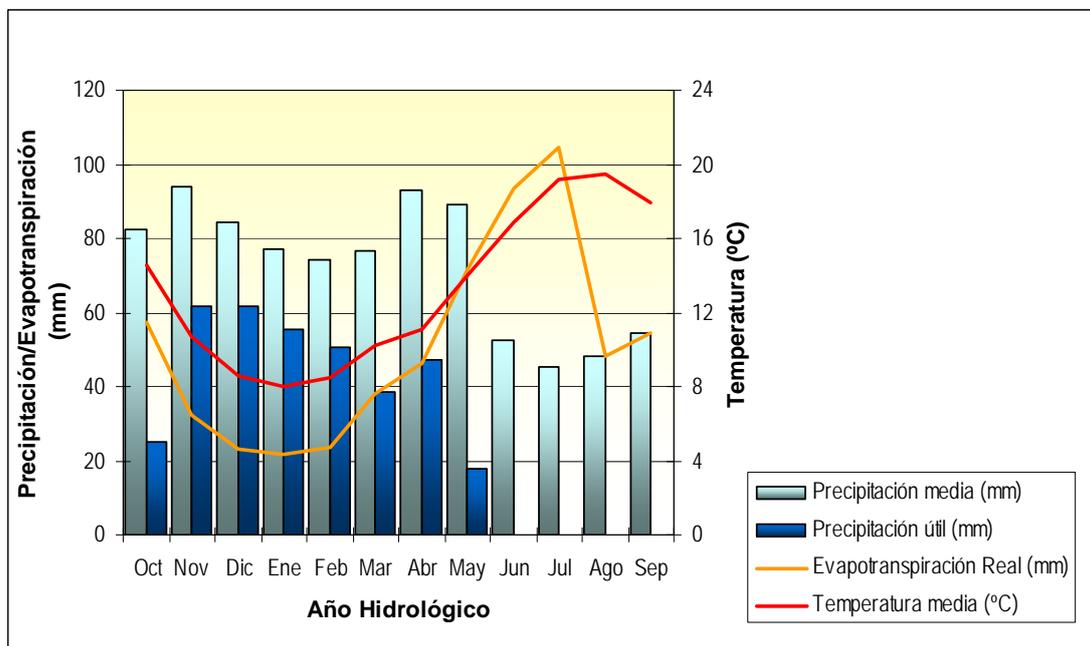


Figura 8-7: Variación de precipitación, temperatura y evapotranspiración real a lo largo de un año hidrológico medio en la zona de estudio

En las siguientes figuras (Figura 8-8, Figura 8-9, Figura 8-10 y Figura 8-11) se muestran los mapas de isotermas medias anuales de la zona de estudio, así como la distribución espacial de los valores medios de evapotranspiración potencial y real en la zona. Finalmente se incluye un mapa de isolíneas de precipitación útil media anual en el área estudiada.

Todos los mapas se han integrado en un SIG (ver Anexo I.1), desarrollado conjuntamente con la empresa Sadim.

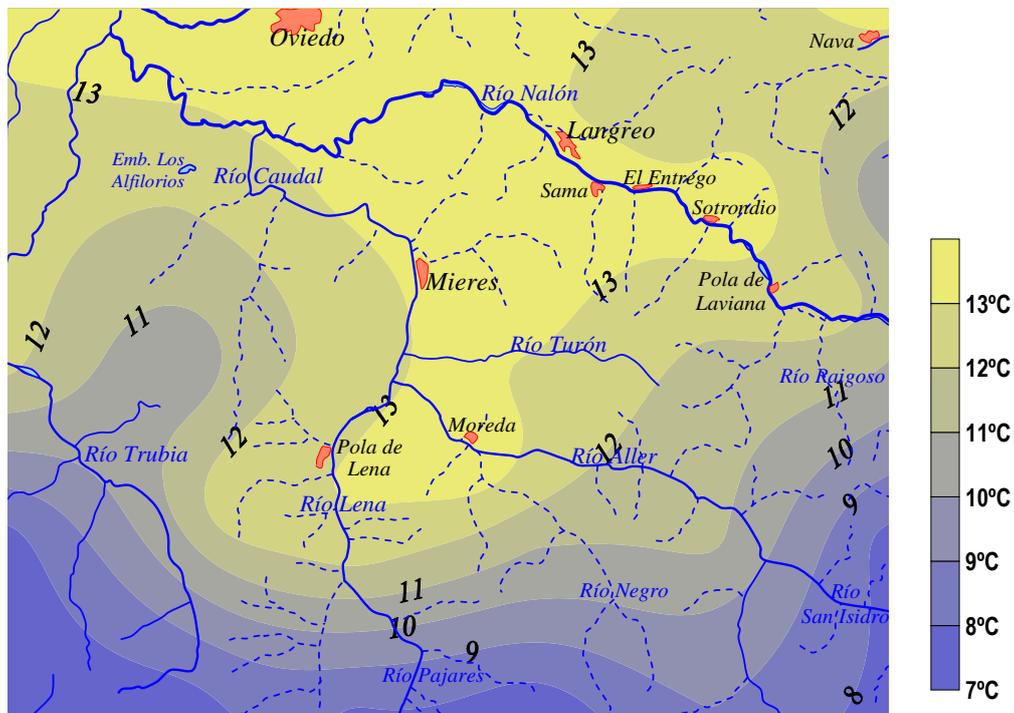


Figura 8-8: Isotermas medias anuales (período 1970/71 – 2005/06)

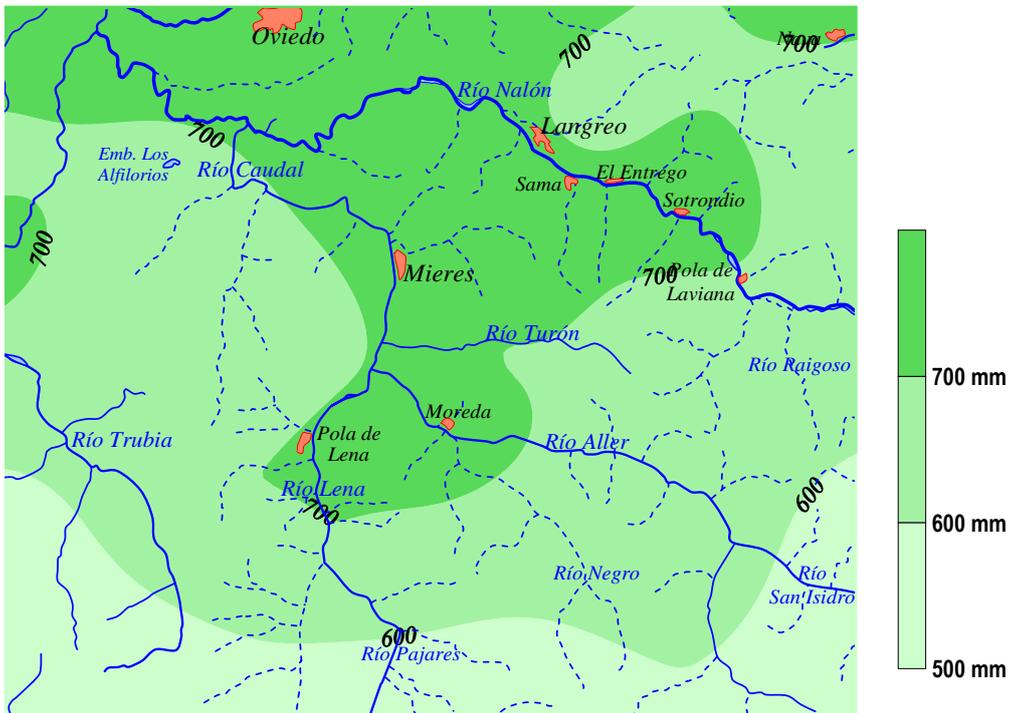


Figura 8-9: Evapotranspiración potencial anual (periodo 1970/71 – 2005/06)

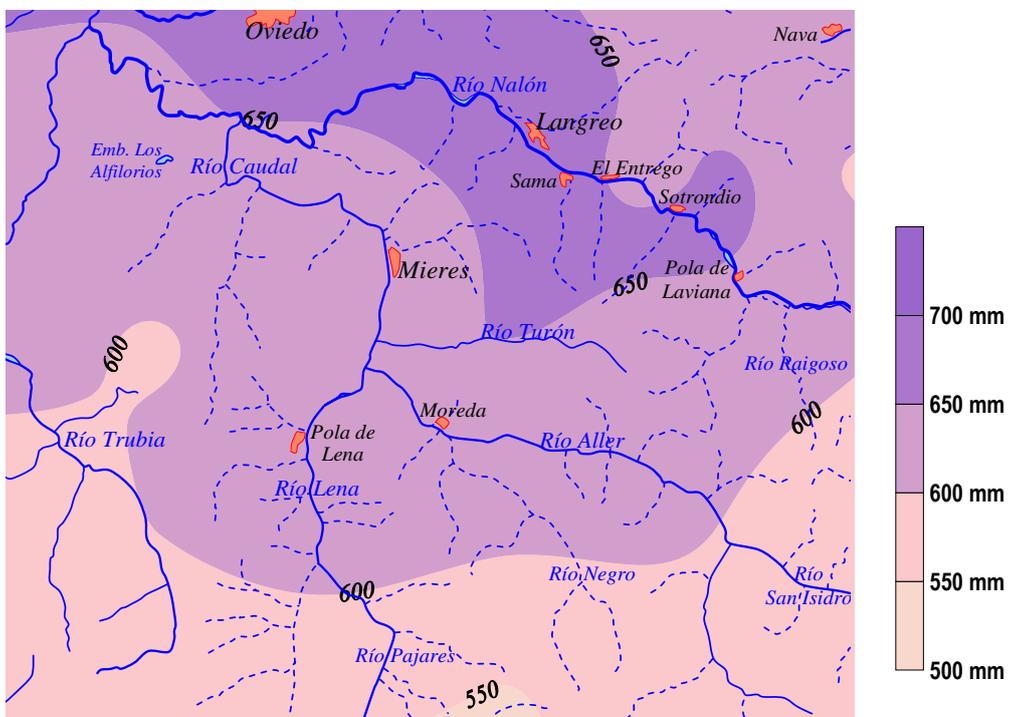


Figura 8-10: Evapotranspiración real anual (periodo 1970/71 – 2005/06)

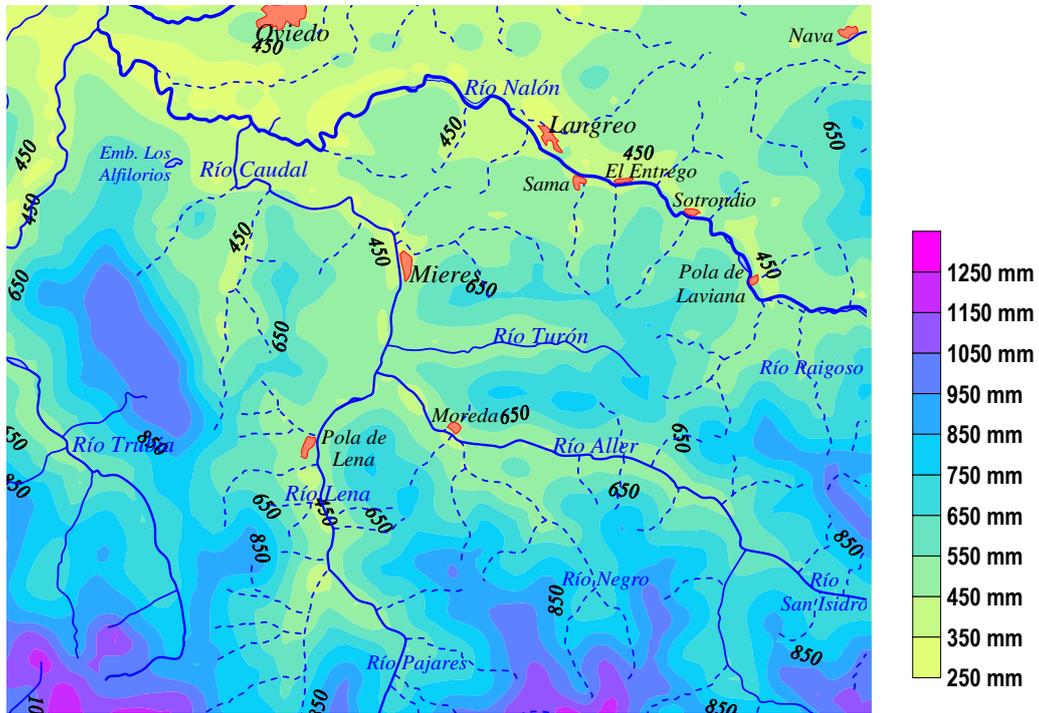


Figura 8-11: Isoyetas de precipitación útil anual (periodo 1970/71 – 2005/06)

9. ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO

La zona de estudio se encuentra incluida en la que actualmente se denomina Masa de Agua 012.012 Cuenca Carbonífera asturiana (Dirección General del Agua, 2005), en un sector que se encontraba fuera del ámbito hidrogeológico de los sistemas acuíferos definidos en el proyecto Investigación hidrogeológica en la Cuenca Norte. Asturias (IGME, 1984) y que se identificaba como Unidad 01.99 (Acuíferos aislados) en la definición de unidades realizada en el Estudio de delimitación de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e islas Baleares (DGOH-ITGE, 1990).

9.1. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DE LOS MATERIALES PRESENTES

Como ya se ha comentado anteriormente en el capítulo 7 los materiales presentes en la zona de trabajo incluyen lutitas, limolitas, areniscas, microconglomerados, conglomerados, calizas y capas de carbón de edad Carbonífero, y depósitos cuaternarios: aluviales, coluviones y antrópicos (escombreras, rellenos compactados, rellenos heterogéneos), aunque de éstos solo los aluviales están representados en la cartografía hidrogeológica.

Según la permeabilidad de los materiales presentes se establecen cuatro conjuntos principales (representados en el mapa hidrogeológico): materiales de permeabilidad muy baja a nula, materiales de baja permeabilidad por fisuración y materiales de permeabilidad variable por fisuración y karstificación, todos ellos correspondientes a sedimentos carboníferos, y materiales de permeabilidad variable por porosidad intergranular, que se corresponden con los depósitos cuaternarios.

Desde el punto de vista hidrogeológico, y concretamente de la permeabilidad de los materiales, hay que tener también en cuenta la posible circulación de agua a

través de las grandes fracturas (fallas) como posibles vías de drenaje, ya mencionadas en el capítulo 7 y los grandes huecos ocasionados por las labores mineras, descritas en el capítulo 6, cuyo origen es antrópico.

Permeabilidad de los materiales carboníferos

En este conjunto se han incluido los sedimentos carboníferos presentes en el área de estudio, que corresponden a una alternancia monótona de lutitas, limolitas y areniscas, así como, aunque con menor frecuencia, niveles con espesores variables de calizas, conglomerados silíceos y abundantes capas de carbón. Dentro de esta alternancia se pueden diferenciar varios niveles según sus características hidrogeológicas (permeabilidad muy baja a nula, baja permeabilidad por fisuración, permeabilidad variable por fisuración y/o karstificación).

Materiales con permeabilidad muy baja a nula: engloban sedimentos correspondientes a diversos ámbitos geológicos; se trata de materiales que podrían ser clasificados como lutitas o limolitas, debido a su bajo metamorfismo, aunque normalmente se los denomina bajo el término minero de pizarras. Pueden ser micáceas, calcáreas, arenosas y bituminosas, con todos los pasos intermedios, y también presentan capas de carbón intercaladas. En algunos estudios realizados en las proximidades de la zona de trabajo, concretamente en el sector donde se ubican los pozos Entrego y San Mamés, se obtuvieron valores de transmisividad y permeabilidad para estos materiales de 0,005 m²/día y 2,96 x 10⁻⁸ m/s, respectivamente (ITGE, 1995). Otros estudios realizados en la Cuenca Carbonífera Central (Fandos *et al.*, 2004) estiman datos de permeabilidad a partir de series de medidas piezométricas temporales obtenidas en zonas del yacimiento no explotadas en profundidad y de ensayos de bombeo en pozos, obteniendo valores de permeabilidad primaria muy baja, por debajo de 10⁻⁷ m/s y entre 5 x 10⁻⁶ y 10⁻⁶ m/s en condiciones de macizo natural fracturado. Estas observaciones implican un macizo virgen prácticamente impermeable. Los estudios y observaciones realizadas en el interior de las

explotaciones del Grupo HUNOSA, en zonas no tronadas, avalan también estas conclusiones.

Materiales con permeabilidad baja por fisuración: representados por cuarcitas, areniscas calcáreas y arcillosas, microconglomerados silíceos (micropudingas) y conglomerados silíceos (pudingas). En estas rocas el valor de la conductividad hidráulica está relacionado con el grado de fisuración, aunque en general los valores son poco elevados. En las investigaciones realizadas en el entorno de los pozos Entrego y San Mamés se han obtenido valores de transmisividad y permeabilidad para las areniscas de $6,5 \text{ m}^2/\text{día}$ y $3,92 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, respectivamente (ITGE, 1995).

Materiales con permeabilidad variable por fisuración y/o karstificación: se trata de niveles de poco espesor formados por calizas y dolomías intercalados entre la serie de lutitas y limolitas. Si bien la conductividad hidráulica primaria de estos materiales es muy baja o prácticamente nula, han desarrollado una permeabilidad secundaria por fisuración y/o karstificación. Aunque los valores de los parámetros hidrogeológicos son variables en función del grado de karstificación y posterior relleno, se considera, en general, que se trata de niveles con permeabilidad media a baja.

Permeabilidad de los depósitos cuaternarios

Materiales con permeabilidad variable por porosidad intergranular: constituidos predominantemente por depósitos cuaternarios (desde lutitas hasta gravas). Por su amplia representación en la zona de estudio y, sobre todo, su situación en sectores que pueden ser afectados por la inundación de las labores mineras, se hace especial mención a los materiales de edad cuaternaria situados en las zonas bajas de los valles. Aunque no se consideran acuíferos importantes, puede existir cierta conexión hidráulica con el agua de las labores mineras. En la llanura aluvial del río

San Juan, a la altura de Batán, estos sedimentos presentan espesores alrededor de los 10 metros, situados sobre el sustrato rocoso y subyacente al relleno artificial, estando situado el nivel freático en torno a los 4 metros de profundidad (Figura 9-1). (ITK ingeniería S.A., 2009).

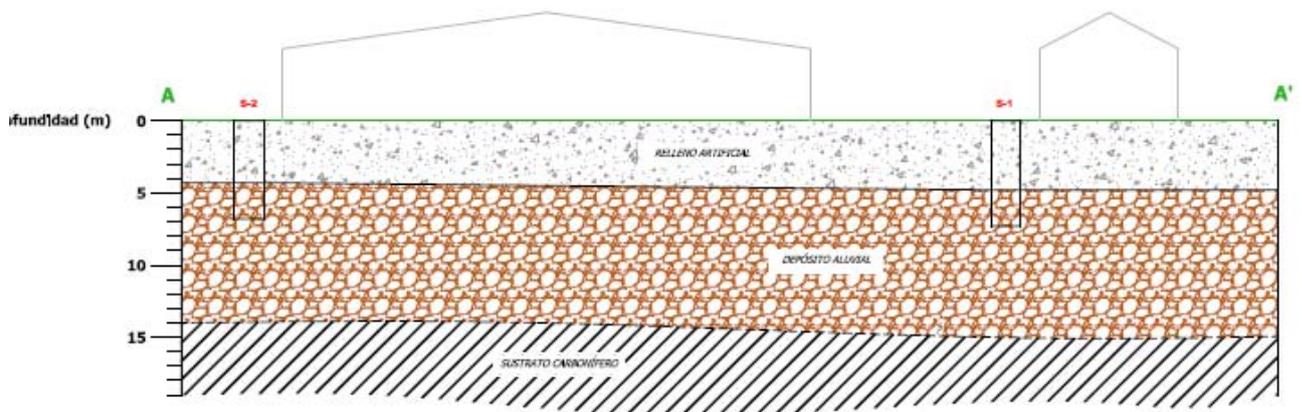


Figura 9-1.-Perfil geológico-Geotécnico A-A' (ITK ingeniería S.A., 2009)

Grandes fracturas

Como se había expuesto en el apartado 2 del capítulo 7, existen en la zona de estudio o su entorno próximas fracturas con brechificación asociada en las que se puede desarrollar una permeabilidad secundaria, constituyendo vías preferentes para la circulación del agua. Uno de los ejemplos destacados es la Falla de la Carrera (Figura 9-2), donde, durante la realización de sondeos mecánicos de investigación minera realizados en el Pozo Candín a finales de los años 70, se detectó abundante circulación de agua a presión asociada a la zona de fractura, que provocó el cese del sondeo (Carlos Luque Cabal, com. pers.).

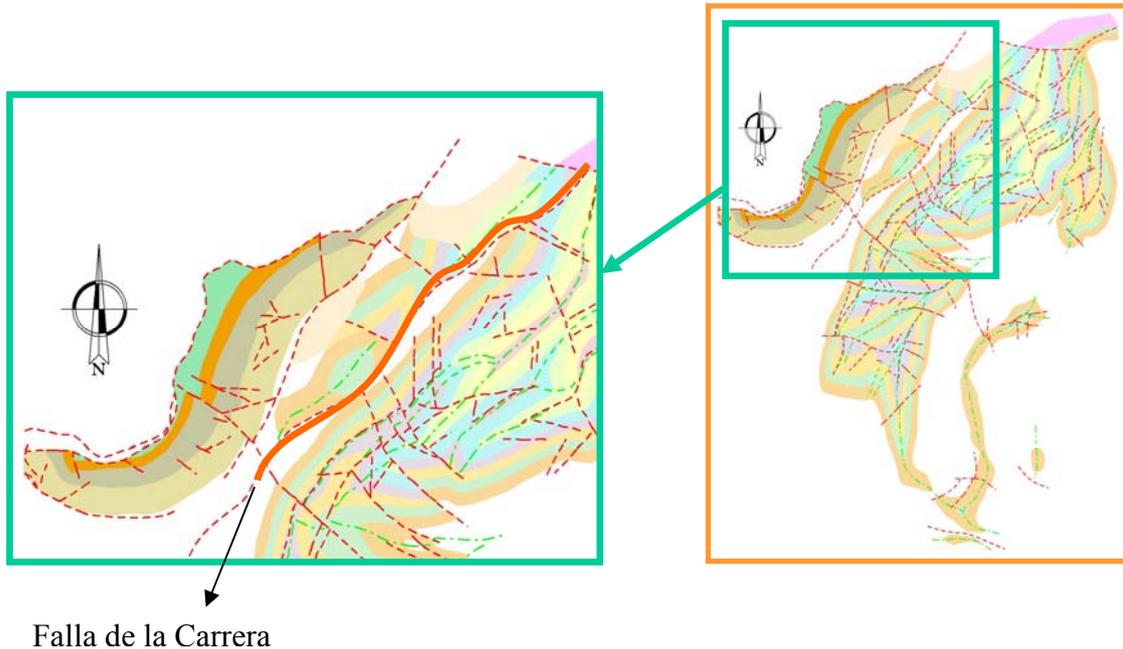


Figura 9-2.-Situación de la Falla de la Carrera, próxima al área de estudio

Labores mineras

La larga historia minera en la Cuenca Carbonífera Central de Asturias ha producido una importante modificación antrópica del subsuelo generada por la construcción de las distintas labores mineras (cañas de pozos, galerías, transversales, recortes, chimeneas, etc.); también los distintos sondeos mecánicos de investigación u otras perforaciones de diversa índole contribuyeron a la alteración del flujo natural del agua subterránea y establecieron una red de conductos interconectados que permite la circulación hídrica a su través. Por lo tanto, un macizo en el que inicialmente podrían existir únicamente formaciones geológicas de baja transmisividad se ha convertido en un sistema que presenta un comportamiento similar al de un acuífero kárstico.

Por otra parte, la propia actividad minera, a partir de la generación de huecos y la práctica de hundimiento y/o relleno, genera modificaciones en la porosidad y permeabilidad de los materiales suprayacentes a las labores, e incluso fenómenos de subsidencia, estableciéndose nuevas conexiones entre los materiales presentes o

dificultando otras preexistentes, lo que puede afectar al flujo natural de las aguas superficiales y subterráneas.

9.2. CARTOGRAFÍA HIDROGEOLÓGICA

La representación gráfica de la cartografía hidrogeológica en el mapa hidrogeológico (Figura 9-3) es el producto de una recopilación de información bibliográfica y cartográfica, la cual ha sido interpretada y sintetizada en un mapa a escala 1:25.000, Anexo II.5, con la finalidad de mostrar algunas características hidrogeológicas de los diferentes niveles litológicos y sobre la que se han superpuesto diversos aspectos de índole hidrogeológica.

La base cartográfica utilizada ha sido:

- Base topográfica digital a escala 1:5.000 del Principado de Asturias correspondiente a las hojas a escala 1:50.000 no 53-Mieres.
- Mapa elaborado en este proyecto a partir de una base cartográfica digital que contiene paquetes mineros y estructuras tectónicas, sobre el que se digitalizaron los niveles permeables de cierta entidad (unos 20 m de espesor como mínimo), cuya situación se obtuvo del análisis de distintos trabajos de cartografía geológica que cubren la mayor parte de la zona de trabajo y de tesis doctorales y tesinas (E.N.A.D.I.M.S.A., 1971-1972-1973; IGME, 1984; Aller, 1986; Casillas, 1984).
- Mapa de Zonas de Riesgo de Inundación del INDUROT (2003), a escala 1:10:000, que incluye los depósitos cuaternarios de la llanura aluvial.

El criterio principal utilizado para la delimitación de la zona de estudio es el área de influencia de las laboras mineras. La zona estudiada abarca toda la cuenca hidrográfica del río San Juan.

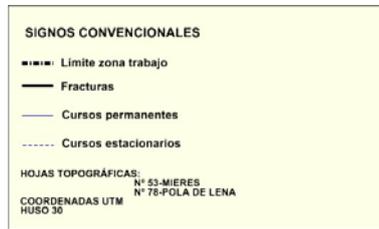
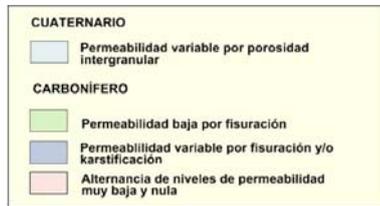
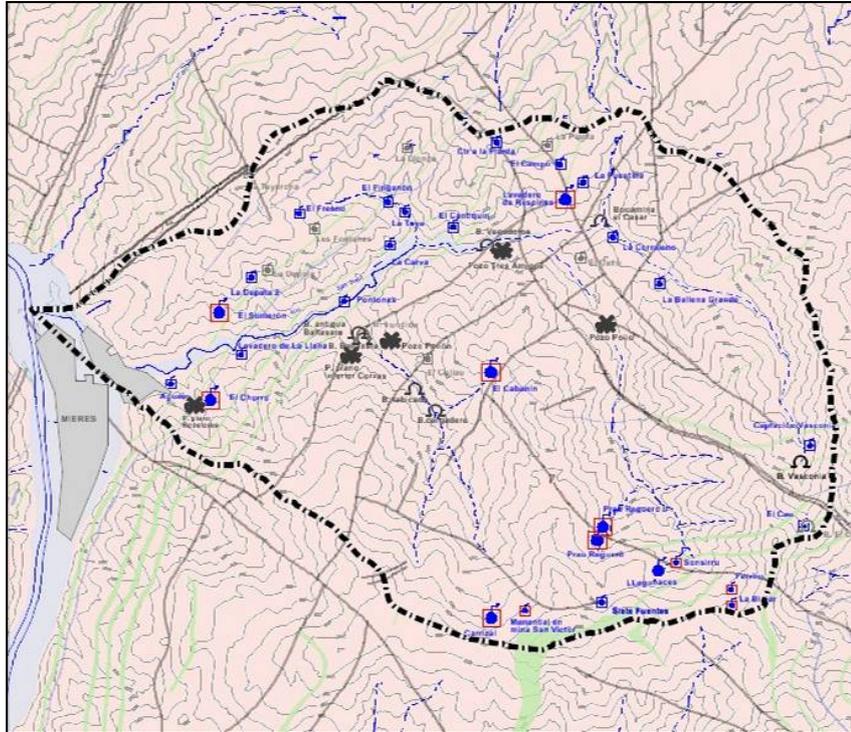


Figura 9-3.-Mapa hidrogeológico

Para la representación de elementos espaciales y puntuales mediante colores y símbolos se han tenido en cuenta las recomendaciones establecidas en la Leyenda Internacional para Mapas Hidrogeológicos, elaborada por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (UNESCO, 1970) y para la de los elementos mineros (bocaminas y

pozos) se empleó la simbología convencional de los mapas geológicos y mineros (Caride *et al.*, 1973). La digitalización de los datos se ha realizado utilizando el entorno Microstation (Bentley) que facilita su posterior implementación en SIG.

Para su representación en el mapa hidrogeológico se han discriminado los materiales en función de su conductividad hidráulica (permeabilidad) clasificándolos en cuatro grupos principales, diferenciados en el mapa mediante un color característico:

- Materiales con permeabilidad muy baja a nula (color ocre)
- Materiales con permeabilidad variable por porosidad intergranular (color azul claro)
- Materiales con permeabilidad variable por fisuración y/o karstificación (color azul oscuro)
- Materiales con permeabilidad baja por fisuración (color verde)

En lo que se refiere a su situación cartográfica, los niveles con permeabilidad variable por porosidad intergranular se distribuyen a lo largo de las llanuras de inundación de los ríos, en especial en las zonas bajas de los valles. Los materiales que presentan permeabilidad variable por fisuración y/o karstificación y permeabilidad baja por fisuración constituyen niveles que se alternan entre los sedimentos de muy baja a nula permeabilidad a lo largo de la zona de trabajo, siendo más abundantes los siliciclásticos. Estos se disponen en bancos de escaso espesor (entre 20 y 60 m) siguiendo las estructuras generales de plegamiento del terreno (sinclinales y anticlinales) y, al igual que el resto de los materiales están afectados por la fracturación.

La realización del inventario de puntos de agua ha permitido completar los datos representados en el mapa hidrogeológico. En cada punto inventariado, y

especialmente en los manantiales, se ha recogido la litología en la que se ubica el punto de surgencia. Además se han recopilado todos los datos disponibles de los organismos y empresas encargados de la gestión y distribución del agua (Ayuntamiento de Mieres). Un aspecto que se ha considerado interesante es recabar información respecto al funcionamiento hidrodinámico del acuífero en cada una de las manifestaciones de los puntos de agua, que fue aportada por los habitantes de la zona. Todos los datos recopilados en esta tarea han sido incorporados al mapa hidrogeológico, que a su vez ha resultado una herramienta de gran utilidad para la interpretación del origen de algunos manantiales.

Los puntos de agua se han representado en el mapa, reflejando algunos aspectos importantes, atendiendo a su naturaleza: los manantiales están diferenciados según su caudal (mayor o menor de 0,5 L/s) y según presenten obra de captación o no; las bocaminas, respecto a si están secas o hundidas o si, por el contrario, se apreció presencia de agua en el momento de la realización del inventario; y, finalmente, los pozos mineros según estén activos o inactivos. También vienen representadas en el mapa las grandes fracturas, que junto con algunos manantiales y bocaminas y los brocales de los pozos de inferior cota de cada valle, constituirán las posibles vías de drenaje del agua que habría que tener en cuenta en un estudio de riesgo de inundación.

9.3. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

Un punto de partida fundamental en el estudio hidrogeológico es el inventario de puntos de agua, que permite desarrollar una infraestructura hidrogeológica, un estudio para la explotación y gestión de las aguas subterráneas y un modelo hidrogeológico.

Para la realización del inventario de puntos de agua se han recopilado datos procedentes de inventarios de distintos organismos: Base de datos del Instituto Geológico y Minero de España, activa en este sector desde 1981 hasta la actualidad,

Inventario de puntos de agua del Ayuntamiento de Mieres (Fernández Álvarez, 2003), y el inventario realizado por la Consejería de Cultura, Comunicación Social y Turismo del Principado de Asturias (Fernández Gutiérrez, 2004), entre otros.

A partir de esta información se realizó una revisión y selección de los puntos inventariados. Éste ha sido un trabajo arduo y continuo en el tiempo, ya que fue necesario realizar un análisis detallado de los datos debido a la falta de precisión o error en las coordenadas de los distintos puntos, lo que dificultó la búsqueda de los mismos; la falta de uniformidad en la designación de topónimos, lo que generó un retraso en el tiempo, al volver a lugares ya estudiados con la idea de encontrar nuevos puntos; el difícil acceso a algunos puntos estratégicos; la desaparición de algunos puntos inventariados debido a obras de distinta índole; la imposibilidad de realización del análisis pertinente, al no encontrarse accesibles algunos puntos, gestionados por Ayuntamientos u otros organismos.

También se ha utilizado una recopilación de documentación cartográfica: fotografías aéreas a escala 1:15.000 del vuelo del año 2003 del Principado de Asturias, mapas topográficos a escalas 1:50.000 y 1:25.000 del Instituto Geográfico Nacional y a escala 1:5.000 del Principado de Asturias correspondientes a las hojas a escala 1:50.000 n^{os} 53-Mieres.

El inventario de puntos de agua se ha realizado utilizando como referencia metodológica el que consta en la Base de Aguas del Instituto Geológico y Minero de España, y ha sido representado en un mapa de escala 1:25.000 situado en el Anexo II.4. Además de los datos de situación, caudal, litología y uso del agua, se han obtenido parámetros físico-químicos (pH, conductividad eléctrica, temperatura del agua y ambiental).

Para la correcta ubicación de los puntos en el mapa se ha contado con la utilización de un GPS de la marca eTrex SUMMIT. Se han utilizado aparatos de la marca Hanna o el equipo multiparamétrico de la marca WTW (modelo "multi

350i/set") para medida del pH y de la conductividad eléctrica y el termómetro empleado es marca Digi-thermo con precisión de 0,1 °C. Las medidas de caudal se han obtenido por los métodos volumétricos, de flotación, de estimación y teóricos en algunos casos.

Para gestionar la información obtenida se realizaron fichas de puntos de agua con los datos de campo y de gabinete, asignando el Id correspondiente al número de registro del Instituto Geológico Minero de España si ya había sido inventariado previamente, o su correspondiente en dicho inventario en el caso de ser un punto de nueva incorporación.

Se han inventariado manantiales, pozos mineros y galerías mineras dentro de los límites de la zona de trabajo. Todos los datos se han recogido en las fichas que aparecen incorporadas a este informe en el Anexo III, las cuales constan de los siguientes campos: Identificación del punto (ID y Toponimia), Situación y coordenadas (UTM), Fotografía, Croquis, Naturaleza, Litología, Parámetros físico-químicos (caudal, pH, conductividad, temperatura) y Análisis químicos en los puntos que forman la red de calidad química del agua (As, Ca, Cd, Cl, Al, CO_3^{2-} , C.E., Cr, Cu, DQO, Fe, Fluoruro, HCO_3^- , Hg, K, Mg, Mn, Na, NH_4 , NO_2^- , NO_3^- , Pb, pH, PO_4^{3-} , RS, Se, SiO_2 , SO_4^{2-} , Zn, S).

La numeración de los puntos se ha realizado respetando la establecida en la Base de Aguas del Instituto Geológico y Minero de España, en el que cada punto se identifica por nueve dígitos: los cuatro primeros corresponden al identificativo de la hoja topográfica a escala 1:50.000; el siguiente dígito hace referencia al octante donde se ubica el punto dentro de esa hoja, comenzando por la parte superior izquierda y finalizando por la inferior derecha, y los cuatro últimos dígitos representan el número ordinal del punto en ese octante.

La aplicación informática utilizada para cargar la información es GESDAGUAS, que gestiona la base de datos Aguas XXI del Instituto Geológico y

Minero de España. Estos datos se han exportado posteriormente para incluirlos en un SIG (elaborado conjuntamente con la empresa Sadim), desde donde, aparte de la propia gestión de los datos, se pueden consultar las características de cada uno de los puntos de agua inventariados (ver Anexo I.1).

En la zona de estudio se han inventariado 52 puntos de agua, que incluyen 5 pozos mineros, 11 bocaminas relacionadas con galerías de minería de montaña y 36 manantiales. Entre los pozos presentes en el inventario, se encuentran tres pozos verticales y dos pozos planos, estando todos ellos inactivos. De los 36 manantiales inventariados, 16 afloran en los niveles permeables constituidos por areniscas que alternan con niveles impermeables de lutitas y limolitas, y 4 en materiales carbonatados; 5 están relacionados con la actividad minera, ya que su surgencia tiene lugar ahora a través de una escombrera; 5 están asociados a zonas de fractura o fallas, y no ha sido posible identificar el origen en el resto (Tabla 9.1). Por lo tanto, de la superposición de los datos inventariados y los niveles permeables se puede deducir que los manantiales inventariados surgen tanto de litologías siliciclásticas como carbonatadas, aunque son más abundantes las primeras, si bien algunos de ellos están relacionados con la presencia de fracturas.

Tabla 9-1.- Resumen de los orígenes de los manantiales

	LITOLOGÍA DE LA SURGENCIA	Número de manantiales
MANANTIALES	Alternancia de lutitas, limolitas y areniscas	13
	Alternancia de lutitas-limolitas-areniscas y relacionado con fracturas	3
	Calizas o dolomías	4
	Escombrera	5
	No litológico (Falla)	5
	No visible	6

Como se mencionó en el apartado anterior, todos los puntos de agua se han incorporado a la cartografía hidrogeológica realizada en el mapa hidrogeológico. Además, sus características más importantes se recogen en la Tabla 9-2.

Tabla 9-2.- Puntos de agua inventariados

Nº de I.R.H.	Coordenadas U.T.M.			NOMBRE	T.M.	Naturaleza	Prof. (m)	Q (l/s)	Observaciones
	Longitud	Latitud	Cota (m)						
1305-2-0022	277396	4793178	214	Bocamina Baltasara	Mieres	galería		15	No se utiliza
1305-2-0023	277347	4793237	214	Bocamina antigua Baltasara	Mieres	galería		3	No se utiliza
1305-2-0024	277390	4793223	225	Bocamina hundida Baltasara	Mieres	galería		No se puede aforar	No se utiliza
1305-2-0025	277886	4792698	361	Bocamina La Ancha	Mieres	galería		0,06	Abto. (que no sea núcleo urbano)
1305-2-0026	278084	4792482	371	Bocamina-cargadero	Mieres	galería		25	No se utiliza
1305-2-0027	279657	4794320	326	Bocamina el Casar	Mieres	galería		0,69	No se utiliza
1305-2-0028	279156	4795055	538	Fte de La Planta	Mieres	manantial		No se puede aforar	Lavadero público
1305-2-0029	278672	4795085	570	Man. Ctra. La Planta	Mieres	manantial		0,08	Abto. (que no sea núcleo urbano)
1305-2-0030	279275	4794872	477	Fte El Campo	Mieres	manantial		0,23	Lavadero público
1305-2-0031	279324	4794532	395	Lavadero Redespines	Mieres	manantial		2,3	No se utiliza
1305-2-0032	279496	4794697	396	La Fuentina	Mieres	manantial		0,07	Abto. (que no sea núcleo urbano)
1305-2-0033	277815	4795032	402	La Llonga	Mieres	manantial		0,04	Fuente pública
1305-2-0034	276784	4794397	512	El Fresno	Mieres	manantial		0,09	Lavadero público
1305-2-0035	276301	4794789	626	La Teyerona	Mieres	manantial		No se puede aforar	Abto. y ganadería
1305-2-0036	276936	4794245	488	Les Fontanes	Mieres	manantial		0,02	Abto. y ganadería
1305-2-0037	276482	4793848	412	La De Pata I	Mieres	manantial		0,15	Fuente pública
1305-2-0038	276330	4793776	391	La De Pata II	Mieres	manantial		0,379	Desconocido
1305-2-0039	276021	4793433	305	El Somerón	Mieres	manantial		0,8	Fuente pública
1305-2-0040	275561	4792744	244	Aguáin	Mieres	manantial		0,798	Fuente pública
1305-2-0041	275938	4792585	288	El Chorro	Mieres	manantial		0,804	Fuente pública
1305-2-0042	278011	4792985	445	El Collau	Mieres	manantial		No se puede aforar	Fuente pública
1305-2-0043	278621	4792842	530	Lavadero El Cabanín	Mieres	manantial		0,5	Lavadero público
1305-2-0044	277653	4794087	294	La Carva	Mieres	manantial		0,12	Fuente pública
1305-2-0045	278574	4794093	288	Vegadotos	Mieres	galería		0,188	No se utiliza
1305-2-0046	279778	4794167	376	La Corraleno	Mieres	manantial		0,158	Fuente pública

1305-2-0047	279473	4793964	502	El Caño	Mieres	manantial		0,018	Fuente pública
1305-2-0048	280225	4793714	431	La Ballena Grande/Escaldaona	Mieres	manantial		0,098	Fuente pública
1305-2-0049	277281	4793553	246	Pontones	Mieres	manantial		0,083	Lavadero público
1305-2-0050	277797	4794409	475	La Teya	Mieres	manantial		0,358	No se utiliza
1305-2-0051	276231	4793026	243	Lavadero de La Llana	Mieres	manantial		0,284	No se utiliza
1305-2-0052	278256	4794264	307	El Cantiquín	Mieres	manantial		0,059	Desconocido
1305-2-0053	277633	4794507	323	El Pinganón	Mieres	manantial		0,25	Desconocido
1305-2-0054	279725	4793315	353	Polio	Mieres	pozo minero	610	43	No se utiliza
1305-2-0055	278710	4794054	314	Tres Amigos	Mieres	pozo minero	500	19	No se utiliza
1305-2-0056	277668	4793170	349	Peñón	Mieres	pozo minero			No se utiliza
1305-2-0057	277283	4793028	332	Plano Interior Corzas	Mieres	pozo minero			No se utiliza
1305-2-0058	275793	4792545	293	Plano Interior Rosolores	Mieres	pozo minero			No se utiliza
1305-6-0001	280906	4790749	855	Ferriru	Mieres	manantial		0,08	No se utiliza
1305-6-0022	278365	4791931	488	Bocamina colmenas	Mieres	galería		0,56	No se utiliza
1305-6-0039	278618	4790475	800	Fuente Carrizal	Mieres	manantial		0,8	No se utiliza
1305-6-0044	278936	4790543	836	Manantial en Mina San Víctor	Mieres	manantial		0,26	Ganadería
1305-6-0052	278506	4791287	562	Bocamina Carrizal	Mieres	galería		10	Abto. (que no sea núcleo urbano)
1305-6-0068	280915	4790592	902	Fuente La Biolar	Mieres	manantial		0,41	Abto. y agricultura
1305-6-0090	279709	4790614	865	Siete Fuentes	Mieres	manantial		0,49	No se utiliza
1305-6-0091	280221	4790930	749	LLagunaces	Mieres	manantial		1,2	No se utiliza
1305-6-0123	281566	4791985	680	Bocamina Vasconia	Mieres	galería		No se puede aforar	Desconocido
1305-6-0124	281659	4792148	683	Captación Vasconia	Mieres	manantial		0,04	Abto. (que no sea núcleo urbano)
1305-6-0125	281600	4791365	855	Bocamina el Cau	Mieres	galería		No se puede aforar	No se utiliza
1305-6-0126	281595	4791365	855	El Cau	Mieres	manantial		0,017	Abto. a núcleos urbanos
1305-6-0127	279630	4791231	664	Prau Reguero	Mieres	manantial		0,51	Abto. (que no sea núcleo urbano)
1305-6-0128	279682	4791356	647	Prau Reguero II	Mieres	manantial		2,5	Ganadería
1305-6-0129	280382	4791009	734	Sonsirru	Mieres	manantial		0,8	Ganadería

9.4. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO

Comportamiento hidrogeológico en régimen natural

En régimen natural, en el área de estudio se pueden diferenciar dos tipos de acuíferos: uno representado por acuíferos aislados, constituidos por niveles permeables intercalados en la serie impermeable carbonífera, y otro formado por los depósitos cuaternarios.

El funcionamiento hidrodinámico natural de los sedimentos carboníferos corresponde al de un terreno de baja permeabilidad constituido por una alternancia monótona de lutitas, limolitas y capas de carbón con niveles permeables intercalados entre ellos, que constituyen acuíferos aislados. Los niveles permeables están formados por areniscas, calizas, conglomerados siliciclásticos (pundingas) y conglomerados carbonatados (gonfolitas) de espesores variables, que no superan, en general, los 40-60 m. La permeabilidad primaria es muy baja o prácticamente nula, si bien se ha desarrollado una permeabilidad secundaria por fisuración y/o karstificación que aumenta ligeramente su valor.

La recarga de estos niveles permeables tiene lugar mediante la infiltración del agua de lluvia a través de las superficies aflorantes, mientras que la descarga se realiza a través de manantiales o directamente a los cursos fluviales. La respuesta a la precipitación ha sido reflejada en el informe final del proyecto de investigación realizado por ITGE (1995), en el que se indica que en el sondeo de San Mamés se midió un ascenso del orden de 5 m tras un periodo de precipitaciones abundantes, si bien se concluye con una estimación de que las areniscas presentan valores bajos de permeabilidad.

Las características hidrogeológicas de estos niveles permeables pueden ser deducidas a partir de las observaciones de campo realizadas; de este modo, según se refleja en el capítulo 9.3 Inventario de Puntos de Agua, los caudales medidos en campo en los manantiales oscilan entre 0,05 y 2,5 L/s, siendo en su mayoría menores que 1 L/s, lo que indica que los valores de permeabilidad no son muy elevados. La mayor parte de los manantiales localizados drenan niveles siliciclásticos o están asociados a zonas de fractura, de lo que se puede deducir que la permeabilidad de estos niveles desarrollada por fisuración es mayor que la de los niveles carbonatados, generada por fisuración y/o karstificación.

Los depósitos cuaternarios presentes en la zona se corresponden principalmente con depósitos aluviales cuya recarga se realiza a través de la infiltración del agua de lluvia; además se pueden producir aportes hídricos procedentes de los cursos de agua superficiales, así como de otros acuíferos (niveles permeables carboníferos). La descarga se realiza a través de manantiales o directamente al cauce fluvial.

El aluvial presenta, en la zona de Batán, espesores que rondan los 4 metros. (ITK Ingeniería S.A., 2009).

La zona de estudio abarca la cuenca del río San Juan, siendo este río afluente del río Caudal. Antes de que tuviera lugar el desarrollo de la minería, la escorrentía superficial predominaba sobremanera sobre la subterránea, que se limitaba únicamente a la circulación a través de los escasos niveles permeables carboníferos que se drenaban por pequeños manantiales o a los cauces fluviales, y a través de los acuíferos cuaternarios. Además, entre estas cuencas no existía comunicación hídrica subterránea.

Alteración del régimen natural durante la explotación minera

La explotación del carbón genera huecos mineros a través de las labores mineras subterráneas y las capas explotadas (hundidas o rellenadas) en un sustrato inicialmente muy poco permeable; además, provoca una fracturación artificial del macizo rocoso que se superpone a las condiciones originales del sustrato. Como consecuencia, se genera un espacio vacío de gran capacidad de almacenamiento formado por un sistema de conductos. Estos conductos constituyen las vías de drenaje en profundidad de las fracturas y niveles permeables intersectados, si bien, debido a que se trata de acuíferos de poco espesor, aislados y de baja permeabilidad, el volumen de agua drenado no constituye el aporte principal de agua al sistema. Una consecuencia directa del drenaje de estos niveles a través de las galerías mineras es la afección total o parcial de múltiples manantiales preexistentes en la zona, ya que se produce un descenso del nivel piezométrico.

Por otra parte, existe una clara conexión entre las labores mineras más antiguas, correspondientes a la denominada minería de montaña, que explotaba el carbón a cota superior a la cota del valle, y las más modernas, de mayor profundidad. El desarrollo de huecos ocasionado por la minería de montaña aumenta la infiltración del agua de lluvia, que posteriormente circula a través de las labores de minería de valle y es evacuada en último término a través de bombeos situados en las cañas de los pozos mineros. En consecuencia, se aprecia una clara correlación entre el volumen de precipitación y el volumen de agua drenada a través de los pozos que, además de estar descrita en los estudios previos realizados sobre la inundación de los pozos mineros (ITGE, 1995), ha sido corroborada con los datos disponibles actuales estimándose un tiempo de retención del agua en la mina variable entre 5 y 45 días, en función de las características de cada pozo, el macizo entre la superficie y el área deshullada, y otros factores que pueden afectar a la infiltración. Además, en ITGE (1995) se ha descrito que no existe relación entre el volumen de agua desaguada y el aumento de la superficie explotada (volumen de huecos creados), lo que indica poca dependencia entre ambos parámetros, por lo que el factor precipitación es el que

condiciona el volumen de drenaje.

Cabe indicar que no todas las labores de minería de montaña presentan conexión directa con las de valle, siendo drenadas en ocasiones a través de bocaminas; muchas de ellas han sido inventariadas en el transcurso de este trabajo (capítulo 9.3).

El agua procedente de la lluvia, que en condiciones naturales circularía preferentemente como escorrentía superficial, ahora se infiltra en parte hasta llegar a los talleres, galerías y transversales, constituyendo el aporte principal de la escorrentía subterránea que es evacuada a través de los pozos. Según los datos disponibles respecto al agua bombeada en los pozos mineros, y los datos de precipitación recogida en la estación pluviométrica Santa Cruz de Mieres para el periodo enero 2002-abril 2008, se estima que el porcentaje medio mensual de bombeo respecto al total de precipitación recogida en la zona de estudio son muy variables, no superando el 20%, en esta correlaciones hay que tener en cuenta que en muchos casos el bombeo superaba la precipitación debido a la necesidad de deprimir los niveles de agua en los pozos. En el gráfico de la Figura 9-4 se comparan los valores mensuales de precipitación frente a los datos de bombeo.

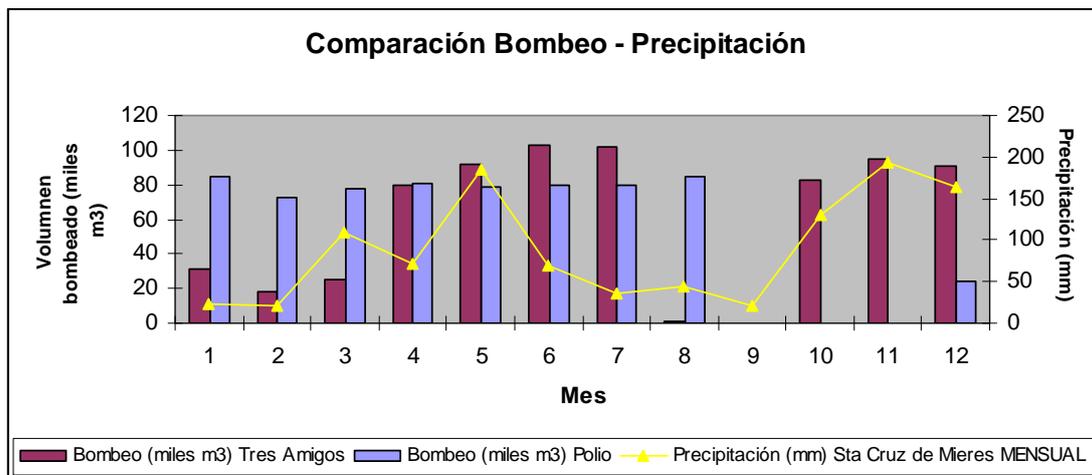


Figura 9-4.-Valores mensuales precipitación-bombeo 2008

10. BALANCE HÍDRICO

10.1. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

La realización del balance hídrico anual permite conocer las relaciones entre las distintas variables hidrológicas así como valorar, entre otros parámetros, el volumen anual de escorrentía o excedentes, el periodo en que se producen excedentes, periodos con déficit de agua, cálculos de demanda de agua, volumen de agua que se infiltra, etc.

En cualquier sistema hídrico se cumple:

Entradas = Salidas + Variación en el almacenamiento

La entrada en la zona de trabajo es la precipitación y las salidas son la evapotranspiración, la escorrentía superficial y la escorrentía subterránea o de infiltración. En la Figura 10-1 se muestra un esquema con los elementos constituyentes del balance.

El estudio del balance hídrico en la zona de Polio – Tres Amigos (Valle del San Juan), permitirá conocer la infiltración en la zona de estudio, parte de la cual corresponde a la recarga de agua que se produce en el conjunto de pozos del Grupo HUNOSA: Polio y Tres Amigos y que es captada y bombeada al exterior. Esta infiltración corresponde al término denominado escorrentía subterránea de la ecuación del balance hídrico y por tanto puede calcularse como diferencia entre la lluvia útil en la superficie estudiada y la escorrentía superficial, considerando que el término de variación en el almacenamiento, para un estudio prolongado en el tiempo, puede suponerse nulo.

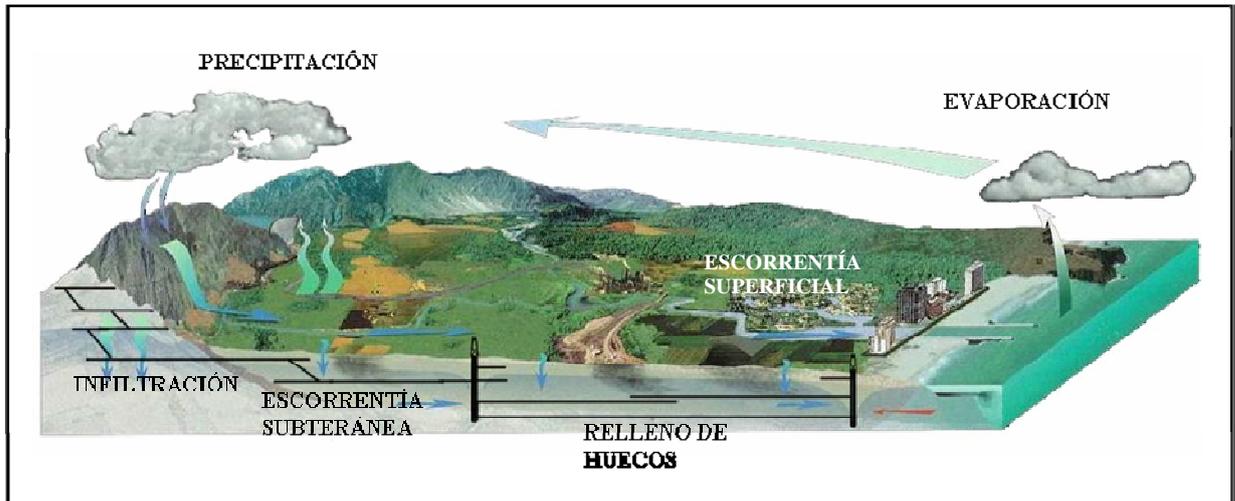


Figura 10-1.- Esquema de balance hídrico (Modificado de López Geta et al, 2001)

Para la obtención de los parámetros anteriores, será necesaria la determinación de la lluvia útil (precipitación menos evapotranspiración real), así como la realización de aforos para estimar las escorrentías superficial y subterránea. Para ello se contó con los datos obtenidos de diversas fuentes (Agencia Estatal de Meteorología, campañas de aforos, inventario de puntos de agua, datos de desagües de pozos, etc.).

La delimitación de la zona de trabajo (Figura 10-2) se ha realizado considerando las divisorias de aguas superficiales que limitan la cuenca hidrográfica del río San Juan, en la que quedan incluidas las labores mineras de los pozos Polio y Tres Amigos. También se ha incluido la subcuenca de un pequeño arroyo afluente del San Juan por el Norte, justo antes de entrar encauzado en la zona urbana de Mieres.

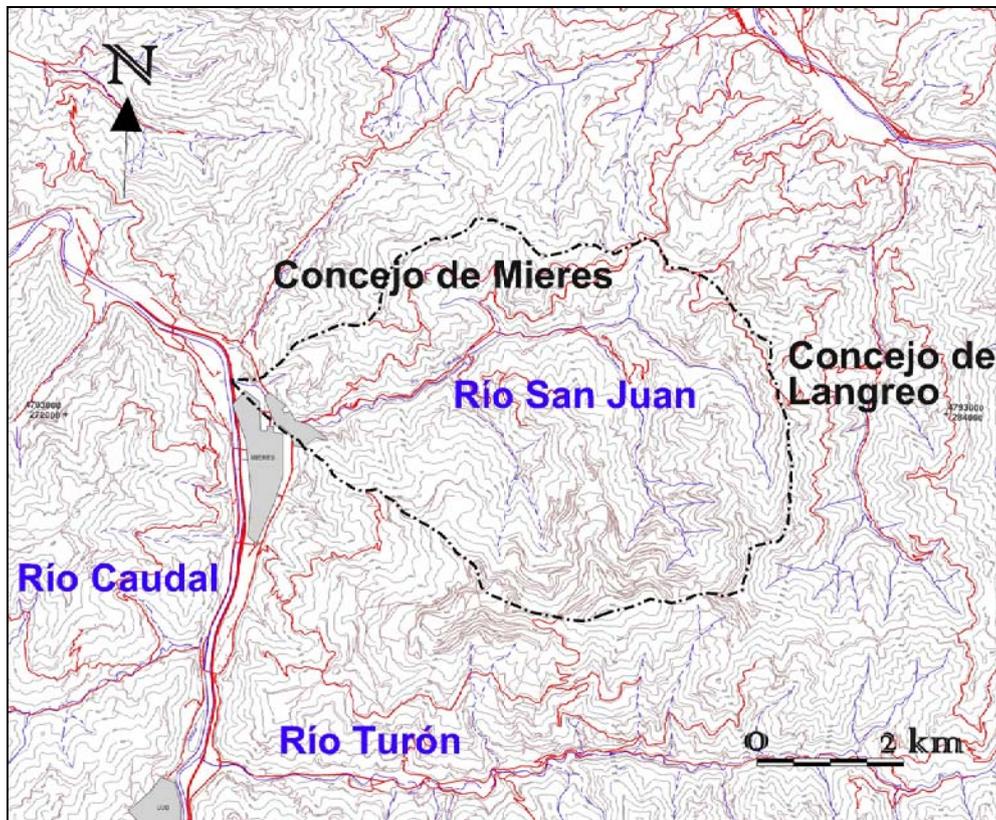


Figura 10-2.- Área de estudio del balance hídrico

10.2. CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN Y LA LLUVIA ÚTIL

Dado que el área de estudio se extiende a un área amplia (cuenca del río San Juan, de 26,96 km²), con cierta variación de parámetros climáticos, resulta más adecuado calcular el valor medio de éstos en toda la cuenca considerada que extrapolar simplemente los valores puntuales correspondientes a una determinada estación.

Para el cálculo de la precipitación media en una cuenca, existen tres métodos clásicos: i) Media aritmética; ii) Polígonos de Thiessen e iii) Isoyetas.

Según este último método, una vez representadas las curvas de igual precipitación (isoyetas) sobre el mapa interpolando valores puntuales, de acuerdo con

la topografía, tal como se muestra en la Figura 10-3, se asigna a la superficie comprendida entre cada dos isoyetas consecutivas, siempre dentro del área limitada por la cuenca a estudiar, una pluviometría igual al valor medio de las dos isoyetas consideradas. La precipitación media se calcula como media ponderada con las áreas entre isoyetas. Se trata del método más preciso, porque tiene en cuenta la relación entre precipitación y altitud (Martínez-Alfaro *et al.*, 2006).

De esta forma, la precipitación media se obtiene como:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

Donde:

P = Precipitación regional (mm).

P_i = Precipitación media entre cada dos isoyetas (mm)

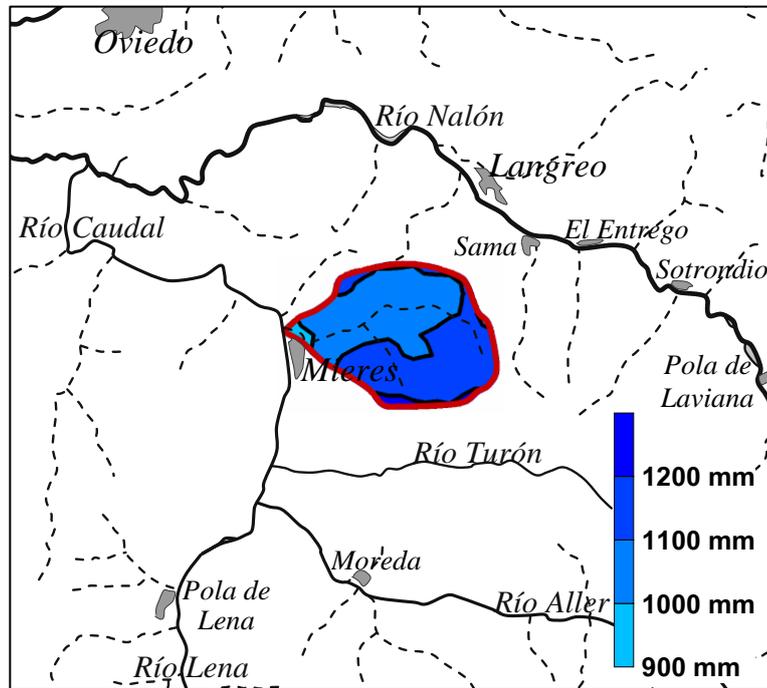
A_i = Área entre cada dos isoyetas (km²).

n = Número de estaciones.

En la Figura 10-3 se muestran las isoyetas de precipitación media anual interceptadas por la cuenca delimitada y cuya precipitación media se desea conocer. También se recogen las áreas entre isoyetas consecutivas y el cálculo de la precipitación media en la cuenca considerada.

Según se ve en la figura, la precipitación media anual en el área de estudio será:

$$P_m = \frac{(950 \cdot 0,50) + (1050 \cdot 12,75) + (1150 \cdot 12,93) + (1250 \cdot 0,78)}{26,96} = 1102mm$$



- Área total: 26,96 km²
- Áreas parciales:
 - <1000 mm: 0,50 km²
 - 1000-1100 mm: 12,75 km²
 - 1100-1200 mm: 12,93 km²
 - >1200 mm: 0,78 km²

Figura 10-3.- Isoyetas de precipitación media anual para el límite de la cuenca. En rojo se representa el límite de la cuenca, y la leyenda muestra los rangos de variación de la precipitación.

De forma análoga, se han calculado los valores medios anuales de evapotranspiración real y de lluvia útil en la cuenca considerada. Estos valores se resumen en la Tabla 10-1.

Tabla 10-1.- Cálculo de la Lluvia útil total anual

	mm/año	l/s
Precipitación media	1102	942
Evapotranspiración real media	640	547
Lluvia útil media	462	395

10.3. CÁLCULO DE LA ESCORRENTÍA

De acuerdo con la ecuación del balance hídrico, la lluvia útil será igual a la escorrentía total, es decir, la suma de escorrentía superficial y subterránea. En condiciones normales, el agua que lleva el cauce que drena la cuenca -si se trata de un

río ganador, como en este caso-, corresponderá al aporte tanto de escorrentía superficial como subterránea (aquella aportada por el acuífero); sin embargo, en aquellas áreas donde por el mantenimiento de un régimen de bombeo, el nivel piezométrico está deprimido por debajo del lecho del río, éste no recibe aporte subterráneo significativo y se puede considerar que su caudal prácticamente procede de la escorrentía superficial, mientras que el agua infiltrada a las labores mineras (que es bombeada y generalmente vertida al cauce en superficie) se puede hacer equivalente a la infiltración.

A partir de lo anterior, en este estudio se ha hecho la simplificación de suponer que durante la fase de bombeo en la cuenca, se extrae todo el agua infiltrada en la misma, por lo que se tomará una infiltración anual igual al volumen bombeado al año en el conjunto de los pozos de la zona; de esta forma, también se supondrá que el caudal del río corresponde básicamente a escorrentía superficial, lo cual no es estrictamente correcto, pero se considera suficientemente preciso para los objetivos de este estudio, en el que se pretende únicamente hacer una estimación global muy simplificada del balance anual de la cuenca, ya que realizar un balance más preciso y para periodos más cortos de tiempo, exigiría un volumen de datos muy superior al disponible.

Se ha realizado por tanto una campaña de aforos del río San Juan antes de su desembocadura en el río Caudal bastante intensiva (aforo diario desde marzo de 2009). A fecha de la realización de este informe, el periodo de muestreo sólo abarca 5 meses, aunque sería deseable continuar con las mediciones al menos durante un año hidrológico.

10.3.1. METODOLOGÍA

Debido a la inexistencia de estaciones foronómicas en el río San Juan, fue necesario realizar una campaña intensiva de aforos del mismo.

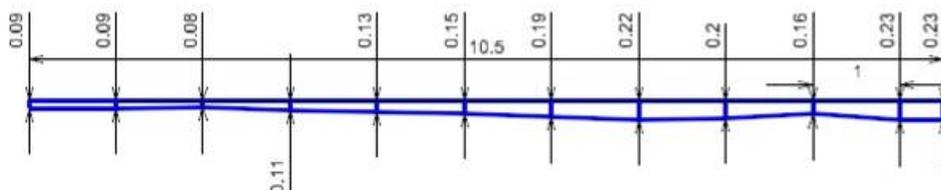
Las medidas de caudal se han realizado mediante aforos directos con la utilización del aforador por ultrasonidos “Flowtracker”, de la marca SonTek, de un molinete digital, y también mediante aforos químicos, empleando en alguna ocasión varios métodos, con el fin de validar resultados.

El método del molinete (Fotografía 10-1) consiste en la medición de la velocidad del agua en toda la superficie de una sección del río determinada. Una vez obtenida la velocidad media de la sección, el caudal se calcula como producto de dicho término por el área total de la misma.



12-03-2009

Desembocadura San Juan (274349, 4793435)



Fotografía 10-1.- a) Aforo con molinete en el río San Juan; b) Detalle del molinete; c) Ejemplo de cálculo de caudal a partir del trazado de la sección y la obtención de la velocidad media en la misma (río San Juan, desembocadura, 12/03/09)

El aforo químico es un método de aforo basado en la dilución de un trazador inyectado en una corriente de agua. Una vez que el trazador está uniformemente repartido en el agua de dicha corriente se mide su dilución, lo que permite el cálculo del caudal.

El método considerado es el de integración o inyección instantánea (Figura 10-4). Consiste en la inyección aguas arriba de cierta cantidad de trazador, diluido en el agua del cauce considerado. Al cabo de un tiempo suficientemente largo, y a una distancia adecuada para que se produzca la dilución uniforme en la corriente se efectúan las medidas que deben durar hasta el paso total de la nube del trazador.

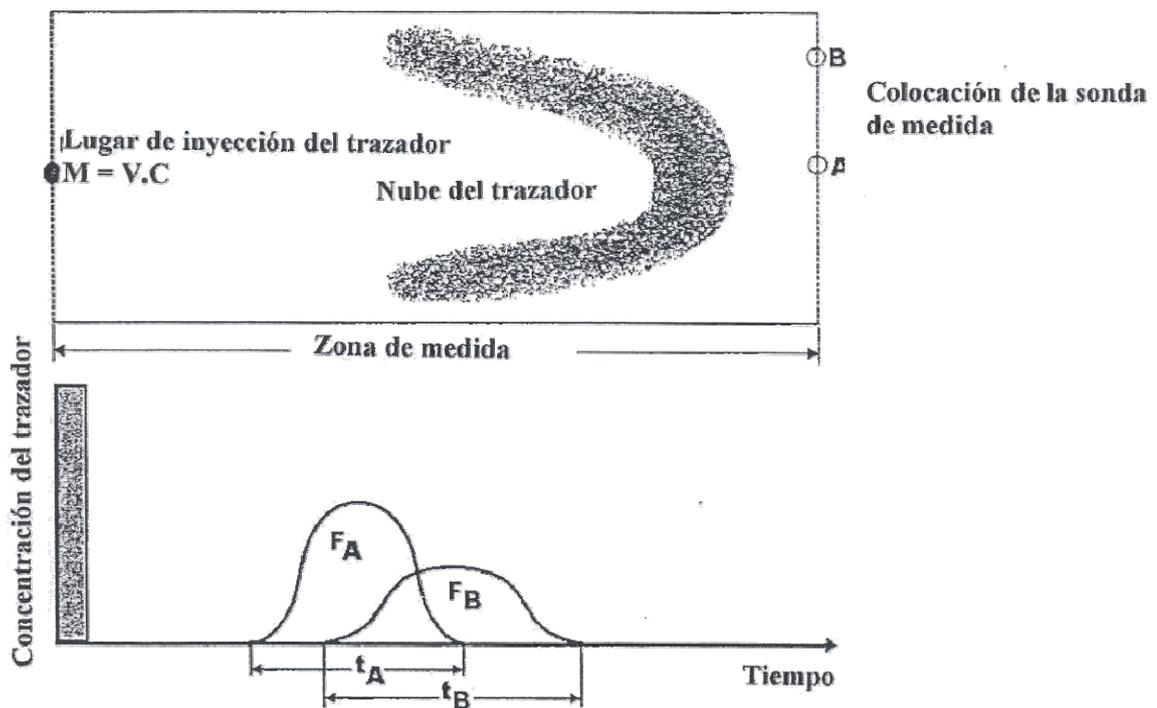


Figura 10-4.- Esquema del método de inyección instantánea

La cantidad de trazador M , su concentración en la solución a inyectar c_1 y la concentración c_2 en la sección considerada, permiten calcular el caudal Q .

Para la realización de los aforos químicos se ha utilizado el dispositivo de marca “Etrelec” denominado “Salinomadd” (Fotografía 10-2). El trazador utilizado es el cloruro sódico (sal común). La evaluación del trazador en el curso de la corriente se realiza mediante la medida de la conductividad eléctrica, que es directamente proporcional a la concentración de esta sustancia. Es por tanto necesaria la inyección de una cantidad de trazador que provoque un aumento significativo de la conductividad por encima del valor de fondo del curso de agua. En principio, la salinidad base debe ser elevada al menos un 10% o 15 mg/l.



Fotografía 10-2.- Aforo químico: a) Preparación del trazador (NaCl); b) Proceso de medida

Los métodos de aforo descritos proporcionan lógicamente valores puntuales del caudal en cada sección considerada. Con objeto de disponer de datos continuados en el tiempo, para la realización de un hidrograma representativo, también se utilizó el método de aforo indirecto por el cual se obtiene el caudal a partir de la lectura de la altura limnimétrica del río sobre una escala homónima colocada *ex profeso* en la sección elegida. Lógicamente, es necesario la calibración del método mediante la realización de suficientes medidas puntuales de caudal (por medio de alguno de los métodos anteriormente descritos), para la obtención de una **curva de gastos** (caudal *versus* altura limnimétrica) lo bastante fiable para permitir obtener el caudal a partir de la altura medida diariamente sobre la escala, por medio de la relación deducida en dicha curva.

A continuación se recogen los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología descrita.

10.3.2. AFORO DEL RÍO SAN JUAN

Puesto que la zona de estudio corresponde a la cuenca del río San Juan, se decidió seleccionar como sección de aforo la correspondiente a la salida de dicha cuenca, es decir, justo antes de la desembocadura de dicho río en el río Caudal. Esta sección se ubica en la zona urbana de Mieres, y aparece situada en la Figura 10-5 y en la Fotografía 10-3. Cabe hacer notar que el caudal del río en este punto puede verse artificialmente incrementado por vertidos de origen antrópico durante su circulación encauzado por la zona urbana, pero fue imposible realizar la campaña de aforos en el río antes de entrar en la urbe, por problemas de acceso.



Figura 10-5.- Situación de la sección de aforo del río San Juan, en Mieres. Coincide con la desembocadura del mismo al río Caudal. (Google Earth 2008).



Fotografía 10-3.- Sección de aforo en el río San Juan

Los resultados de los aforos realizados en estos puntos mediante los métodos mencionados anteriormente recogen en la Tabla 10-2, donde se indica la fecha en que fueron realizados y el método utilizado. En los anexos aparecen los datos de los aforos de manera más detallada.

Tabla 10-2.- Resultados de los aforos realizados en el río San Juan

Fecha de aforo	Método	Caudal (l/s)
12-3-09	Flowtracker	905,0
26-3-09	Flowtracker	627,0
16-4-09	Flowtracker	898,0
30-4-09	Flowtracker	595,3
15-5-09	Flowtracker	442,4
26-5-09	Flowtracker	367,0
3-6-09	Flowtracker	183,0
17-6-09	Flowtracker	133,0
1-7-09	Flowtracker	130,8
9-7-09	Flowtracker	83,9

Como ya se ha explicado en la metodología, con objeto de disponer de datos diarios de caudal, el día 14 de Mayo de 2009, en presencia de personal de Confederación Hidrográfica del Cantábrico y de la Guardería fluvial de la zona, se procedió a la colocación de una escala limnimétrica fijada a la pared del cauce a la altura de la sección de aforo elegida. La escala es metálica con divisiones grabadas en cm, en colores blanco y negro, de 1 metro de longitud y una anchura de 6,3 cm, y se muestra en la en la Fotografía 10-4.



Fotografía 10-4.- Escala limnimétrica anclada a la pared del cauce en la sección de aforo del río San Juan

Las alturas limnimétricas registradas hasta el momento de la realización del presente informe se muestran en la siguiente tabla, en la que además se recoge el caudal correspondiente, de acuerdo con la curva de gastos de la Figura 10-6. Lógicamente, esta curva se irá modificando a medida que vayan realizando aforos puntuales para su calibración.

Tabla 10-3: Alturas limnimétricas registradas y caudales deducidos a partir de la curva de gastos, en la desembocadura del río San Juan

FECHA	Altura limnimétrica (cm)	Caudal (l/s)
14-5-09	12	283,2
15-5-09	9,5	205,7
18-5-09	9	192,9
19-5-09	9	192,9
20-5-09	9	192,9
21-5-09	9	192,9
22-5-09	9	192,9
25-5-09	10	219,3
26-5-09	10	219,3
27-5-09	9,5	205,7
28-5-09	9,5	205,7
29-5-09	9,5	205,7
1-6-09	9	192,9
2-6-09	9	192,9
3-6-09	8	169,7
4-6-09	8	169,7
5-6-09	8	169,7
8-6-09	8,5	181,0
9-6-09	8	169,7
10-6-09	8	169,7
11-6-09	8	169,7
12-6-09	7,5	159,2
15-6-09	8	169,7
16-6-09	8	169,7
17-6-09	8	169,7
18-6-09	7,5	159,2
19-6-09	8	169,7
22-6-09	8	169,7
23-6-09	8	169,7
25-6-09	8	169,7
1-7-09	9	192,9
24-7-09	7	149,4

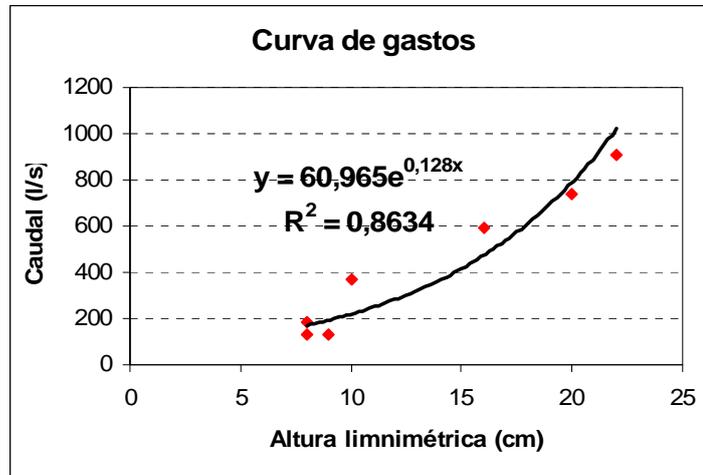


Figura 10-6.- Curva de gastos correspondiente a la sección de aforo en la desembocadura del río San Juan

Con las medidas anteriores, junto con las puntuales anterior y simultáneamente realizadas, se ha obtenido el siguiente hidrograma para el periodo de aforo. Obviamente, éste puede modificarse en tanto en cuanto lo haga la curva de gastos en sus posteriores calibraciones. Representado conjuntamente con la lluvia útil, se ve cómo el caudal se reduce en los meses de verano, en los que la lluvia útil es inexistente, dado el alto régimen de evapotranspiración.

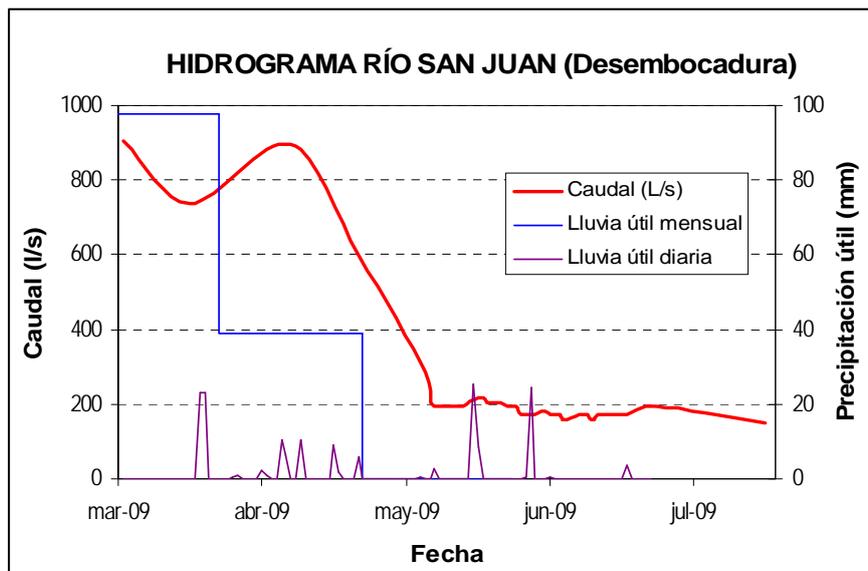


Figura 10-7.- Hidrograma del río San Juan a la altura de su desembocadura durante el periodo de aforo, comparado con la lluvia útil en dicho periodo

A partir de los datos recogidos, junto con otros históricos de los que se disponía y de la lluvia útil media estimada para el periodo de más de 30 años para el que se ha realizado el estudio climático, se ha realizado, de forma muy aproximada, el siguiente hidrograma del río San Juan, para un año hidrológico medio, observándose que el caudal medio ronda los 400 l/s.

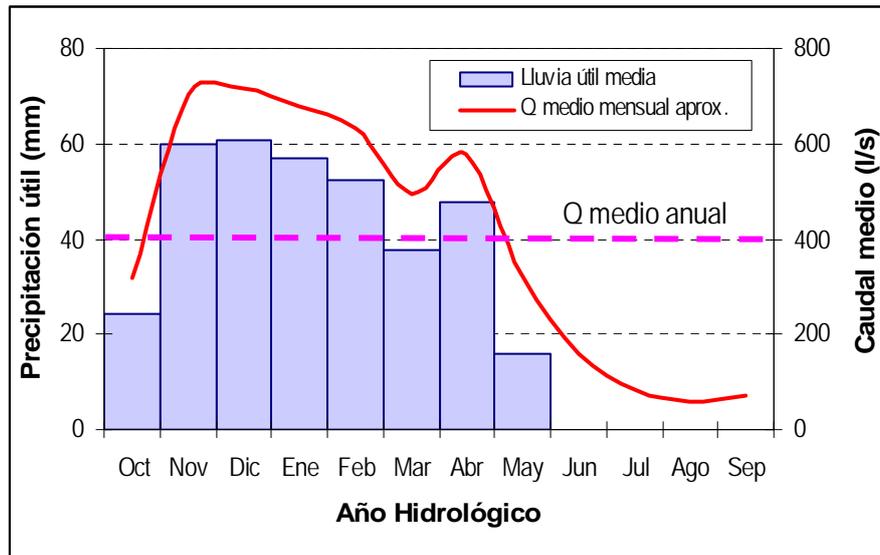


Figura 10-8.- Lluvia útil e Hidrograma aproximado del río San Juan, para un año hidrológico medio

10.4. CÁLCULO DE LA INFILTRACIÓN

Como se ha indicado en el capítulo 6, el valle del río San Juan se ha visto influenciado primeramente por las labores mineras de montaña, y a partir de los años 50 por las labores de los pozos mineros Polio y Tres Amigos, que finalizaron su explotación en 1993 y en 2002 respectivamente y actualmente están inundados, aunque continua el bombeo para mantener determinados niveles. El nivel del Pozo Polio se mantiene en 3ª planta, y el del Pozo Tres Amigos por encima de 1ª planta. En la siguiente figura se observan en planta las labores mineras en la zona, las cuales, si bien no ocupan toda la superficie de la cuenca, sí constituyen, por la fracturación del

terreno por ellas inducida, la vía preferente de infiltración del agua de lluvia. El mantenimiento del bombeo a un nivel bastante constante, junto con la escasa permeabilidad de aquellos terrenos no afectados por labores mineras, hace que la infiltración para periodos largos, como los aquí considerados, se pueda igualar al bombeo de los pozos.

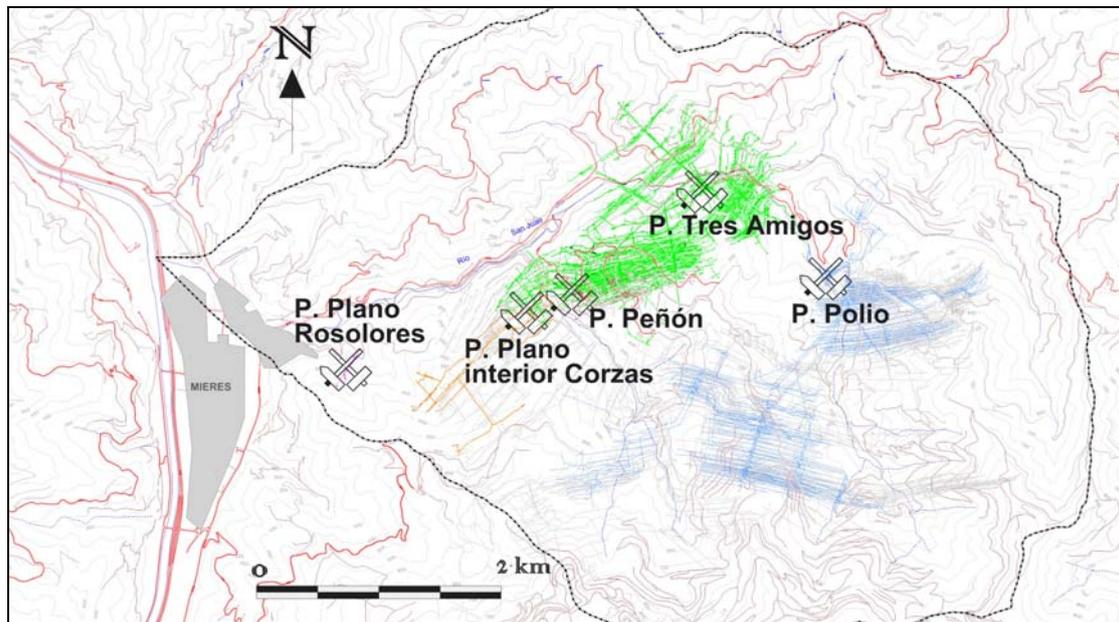


Figura 10-9.- Extensión de las labores mineras de la zona de estudio

En la Tabla 10-4 se muestran los caudales medios bombeados de los pozos de la zona objeto de estudio para el periodo 2002-2008 (del Pozo Tres Amigos sólo tenemos 2004-2008), aportados por el departamento de Medio Ambiente del Grupo HUNOSA.

Tabla 10-4.- Caudales evacuados por los pozos de la zona de estudio durante el periodo 2002-2008

	Caudal Medio Anual evacuado (m ³ /año)	Caudal Medio evacuado (l/s)
Pozo Polio	1.358.280	43,07
Pozo Tres Amigos	611.144	19,38
TOTAL	1.969.424	62,45

De los datos anteriores calculados a partir del total de horas de bombeo mensuales de cada pozo que queda registrado en los sistemas de control ambiental, se deduce que el caudal medio evacuado por el total de los pozos es de unos 60 l/s.

Con estos datos, es posible realizar un modelo conceptual simplificado para un año medio a partir de los datos anuales de los que se dispone, tanto de climatología como de esorrentía y de bombeo de pozos.

De los aproximadamente 950 l/s que caen en forma de precipitación en la cuenca estudiada, una cantidad cercana al 60% (550 l/s) se evapotranspira, como se deduce del estudio climático, mientras que el resto (lluvia útil, del orden de 400 l/s) se divide entre esorrentía superficial e infiltración. La infiltración en la cuenca se ha estimado en unos 60 l/s, lo que supone un 15% de la lluvia útil, por lo que el aporte de la precipitación al cauce en forma de esorrentía superficial se estima en unos 340 l/s. Como ya se ha apuntado, estas cifras no son más que estimativas y preliminares, y sería deseable disponer de un mayor volumen de datos de aforos y de caudales bombeados en los pozos, para poder realizar un balance hídrico más ajustado.

En el año 1999 el Grupo HUNOSA concluyó un proyecto ECSC, de Referencia: nº 7220-PR057 (Gutierrez Peinador, 1999), que comenzaba tres años antes, durante el cual se procedió a un intenso estudio hidrogeológico de las zonas afectadas por labores mineras, mediante la realización de sondeos, pruebas de permeabilidad, ensayos de bombeo, y control continuo de parámetros de calidad y volumen de las aguas de sus pozos mineros y bocaminas de montaña, del que se extraían las siguientes conclusiones, entre otras:

- En las condiciones de origen, la cuenca es prácticamente impermeable, con fracturas a través de las que el agua penetra, filtrándose a veces en grandes cantidades a las explotaciones.

- La explotación minera causa también un proceso de descompresión en las rocas adyacentes, pero con un radio de influencia muy limitado. Pese a esta descompresión, el macizo sigue sin ser un buen trasmisor de agua.
- En las zonas de estudio, se llegó a la conclusión de que la permeabilidad media era inferior a 10^{-7} m/s, pudiendo alcanzar en zonas de fracturas valores comprendidos entre los $5 \cdot 10^{-6}$ y 10^{-6} m/s.

Teniendo esto en cuenta, se puede suponer que entre un 90 y un 95% de lo que se infiltra va a las labores mineras. Para el modelo conceptual, se le ha asignado a la infiltración un valor de unos 60 l/s, que se corresponde con el valor medio bombeado por los pozos.

Se pueden analizar dos escenarios: el primero, el original en el que aún existe bombeo en los pozos de la zona de estudio (Figura 10-10) y el segundo, aquel correspondiente a la situación después del cese del bombeo, cuando finalice la inundación (Figura 10-11).

Durante el bombeo, el nivel piezométrico se encuentra deprimido y prácticamente toda el agua que se infiltra es vertida nuevamente al río. Como se ha visto, la suma del bombeo medio de los pozos del valle del San Juan (Polio y Tres Amigos) es de unos 60 l/s. Se tiene así que el río San Juan llevaría en su desembocadura al río Caudal, a la salida de la zona de estudio, un caudal de unos 400 l/s, resultado de la lluvia útil. Esta cifra coincide con la deducida de forma aproximada de los aforos realizados (apartado 10.3.2.).



Figura 10-10.- Modelo conceptual simplificado de balance hídrico en la zona de estudio para un periodo anual durante la fase de bombeo

En el segundo caso, que corresponde a la situación tras la interrupción del bombeo en los pozos del valle del San Juan y la consiguiente inundación completa de las labores, tendría lugar la recuperación del nivel piezométrico debido a la infiltración en la zona. Al no recibir el aporte de 60 l/s del caso anterior debido al bombeo, en este caso, el río San Juan en su desembocadura al río Caudal aportaría un caudal de 340 l/s .

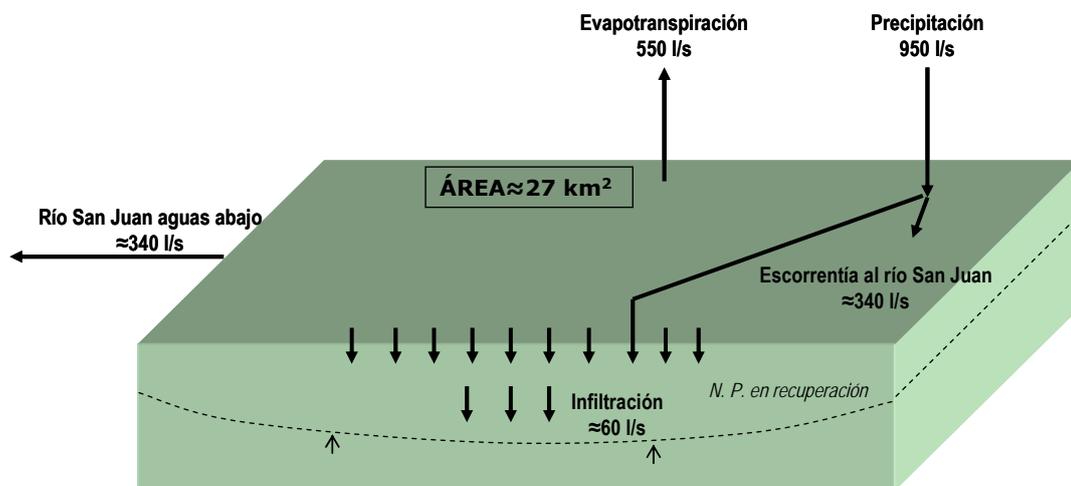


Figura 10-11.- Modelo conceptual simplificado de balance hídrico en la zona de San Juan tras la interrupción del bombeo

11. ESTUDIO HIDROQUÍMICO

11.1. METODOLOGÍA

11.1.1. RED DE CALIDAD, CRITERIOS DE SELECCIÓN

De los 52 puntos de agua inventariados se seleccionaron 9 puntos (cuya situación figura en el mapa del Anexo II.6) para formar parte de la red de calidad, atendiendo a los siguientes criterios:

- Se incluyeron puntos correspondientes a los distintos tipos de aguas según su naturaleza: bocamina, pozo y manantial
- La distribución espacial se realizó de forma que fuera lo más extensa posible dentro del área de estudio, si bien primó la proximidad a zonas en las que existiera riesgo de inundación
- Para los manantiales se estableció un caudal mínimo de 0,5 L/s
- Otros aspectos contemplados fueron su accesibilidad y su utilización.

La red de calidad propuesta consta de 2 pozos mineros, 3 manantiales y 4 bocaminas. Un ejemplo de cada tipo se muestra en las fotografías 11-1, 11.2 y 11-3.



Fotografía 11-1.-Bocamina Vegadotos



Fotografía 11-2.-Tubería de vertido del Pozo Tres Amigos



Fotografía 11-3.- Fuente El Campo

11.1.2. MUESTREO PARA ANÁLISIS QUÍMICO

En todos los puntos se tomaron 2 L de agua, en botellas de polietileno, para análisis de especies mayoritarias, minoritarias no metálicas y parámetros físico-químicos, 0,5 L en botella del mismo material, para análisis de sustancias metálicas, acidulándose con ácido nítrico (60%) hasta alcanzar un pH < 2 uds (aproximadamente 3 mL) y 0,5 L más, en el mismo tipo de recipiente, para determinación de sulfuros, tratándose con acetato de Zn (4 gotas en 100 mL) y NaOH 1N hasta alcanzar un pH > 9 uds (4 mL en 500 mL). Todas las botellas fueron aclaradas varias veces con el agua de muestreo antes de proceder a la toma de la muestra, a fin de eliminar posibles impurezas. Las determinaciones realizadas “in situ” fueron pH y conductividad, medidos con un equipo multiparamétrico de la marca WTW (modelo "multi 350i/set", fotografía 11-4), además de la temperatura del agua y ambiental, para lo que se utilizó un termómetro digital “digithermo” con precisión de 0,1 °C.



Fotografía 11-4- Equipo multiparamétrico de la marca WTW (modelo "multi 350i/set")

11.1.3. ANÁLISIS QUÍMICOS LABORATORIO CAASA

En este apartado se incluyen las especificaciones correspondientes a la determinación de los parámetros físico-químicos y químicos en el Laboratorio de CAASA (Murcia). Este laboratorio tiene establecido un Sistema de Calidad según la Norma UNE-EN ISO/IEC 17025 (Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración).

Los parámetros determinados han sido los siguientes:

Constituyentes mayoritarios

- Aniones: bicarbonatos, cloruros y sulfatos
- Cationes: calcio, magnesio, sodio y potasio
- Sustancias poco ionizadas o en estado coloidal: sílice

Constituyentes minoritarios y traza

- Aniones: carbonatos, fosfatos, fluoruros y sulfuros
- Cationes: cobre, cinc, hierro, manganeso, aluminio, cadmio, plomo, arsénico, selenio, cromo y mercurio
- Otras determinaciones: nitratos, nitritos y amonio
- Residuo seco: Peso en mg/L después de evaporar 1 L de agua
- Oxidabilidad al MnO₄K: También denominado "demanda química de oxígeno" (DQO), este valor es un indicativo de la presencia o ausencia de contaminación en el agua, y representa la cantidad de oxígeno consumido en la oxidación de sustancias reductoras presentes en el agua mediante oxidantes químicos; normalmente se utiliza el permanganato potásico y el dicromato potásico.

En la Tabla 11-1 se describen los procedimientos técnicos utilizados según el parámetro determinado, y los límites de detección figuran en la Tabla 11-2.

Tabla 11-1.- Procedimientos técnicos. Laboratorio de CAASA (Murcia)

Parámetros Investigados	Método Analítico
pH	Electrometría (PIE-pH)
Conductividad a 20 °C	Electrometría (PIE-COND)
Cloruros	Cromatografía Iónica (PIE-CION)
Sulfatos	Cromatografía Iónica (PIE-CION)
Bicarbonatos	Acidimetría, con anaranjado de metilo (PIE-ALCA)
Carbonatos	Acidimetría, con fenoltaleína (PIE-ALCA)
Nitratos	Cromatografía Iónica (PIE-CION)
Sodio	Espectrofotometría de absorción atómica en llama (PIE-NaKA)
Magnesio	Espectrofotometría de absorción atómica en llama (PIE-MgAA)
Calcio	Espectrofotometría de absorción atómica en llama (PIE-CaAA)
Potasio	Espectrofotometría de absorción atómica en llama (PIE-NaKA)
Nitritos	Cromatografía Iónica (PIE-CION)
Amonio	Espectrofotometría de absorción molecular (PIE-AMON)
Fosfatos	Cromatografía Iónica (PIE-CION)
Silice	Espectrofotometría de absorción molecular (PIE-SILI)
DQO	Digestión con dicromato y fotometría (PIE-DQOT)
Fluoruros	Cromatografía Iónica (PIE-CION)
Sulfuros	Espectrofotometría de absorción (PIE-HSUL)
Residuo Seco	Secado a 110°C y gravimetría (PIE-RS10)
Manganeso	Espectrofotometría de absorción atómica en llama (PIE-MnAA)
Cadmio	Espectrometría de absorción atómica-cámara de grafito (PIE-CADM)
Aluminio	Espectrometría de absorción atómica-cámara de grafito (PIE-ALUM)
Selenio	Espectrometría de absorción atómica-cámara de grafito (PIE-SELE)
Zinc	Espectrofotometría de absorción atómica en llama (PIE-AA01)
Mercurio	Espectrofotometría de absorción atómica-vapor frío (PIE-MERC)
Cromo	Espectrofotometría de absorción atómica en llama (PIE-AA01)
Hierro	Espectrofotometría de absorción atómica en llama (PIE-FeAA)
Arsénico	Espectrometría de absorción atómica-cámara de grafito (PIE-ARSE)
Plomo	Espectrofotometría de absorción atómica en llama (PIE-AA01) // Espectrometría de absorción atómica-cámara de grafito (PIE-PLOM)
Cobre	Espectrofotometría de absorción atómica en llama (PIE-AA01)

Tabla 11-2.- Límites de detección

Parámetros	Límites de detección (mg/L)
Aluminio total	<0,0025
Amonio	<0,04
Anhidrido Silicico	<0,2
Arsénico total	<0,010
Bicarbonatos	<5
Cadmio total	<0,0001
Calcio	<2
Carbonatos	<5
Cloruros	<2
Cobre total	<0,1
Conductividad 20°C	<5
Cromo total	<0,0015
D.Q.O.	<3
Fluoruros	<0,02
Fosfatos	<0,04
Hierro total	<0,02
Magnesio	<2
Manganeso total	<0,05
Mercurio total	<0,0013
Nitratos	<1
Nitritos	<0,1
pH	<0,13
Plomo total	<0,02
Potasio	<0,05
Residuo Seco	---
Selenio total	<0,010
Sodio	<0,03
Sulfatos	<4
Sulfuros	<0,1
Zinc total	<0,03

11.1.4. INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

La interpretación de la información se ha realizado en primer lugar mediante la caracterización hidroquímica de las muestras; para ello, se utilizaron los criterios que vienen siendo habituales en los trabajos del IGME, en parte descritos en Hem (1970) y Lloyd y Heathcote (1985), que son los siguientes:

Facies: se considera facies predominante aquella especie iónica que, expresada en tanto por ciento de meq/L, supera el 50% del contenido en aniones o cationes, y facies secundaria la que supera el 25%.

Mineralización: se expresa a partir de la conductividad eléctrica del agua, utilizando la siguiente clasificación:

Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Mineralización
< 65	Sin mineralización
65 – 200	Muy débil
201 – 500	Ligera
501 – 2.000	Notable
> 2.000	Fuerte

Dureza: expresada en mg/L de CaCO_3 , se determina mediante la expresión:

$$D = \left(\frac{\text{mg/L Ca}^{2+}}{40} + \frac{\text{mg/L Mg}^{2+}}{24} \right) \times 100$$

Los intervalos considerados son:

D (mg/L CaCO_3)	Dureza
0 – 40	Muy blanda
41 – 120	Blanda
121 – 350	Media
351 – 650	Dura
> 650	Muy dura

Una vez realizada la caracterización hidroquímica del agua se ha procedido a la realización de una serie de representaciones gráficas como herramienta de apoyo a la interpretación de los resultados de los análisis químicos, así como para visualizar de forma gráfica algunos aspectos de las muestras.

La representación gráfica de los puntos en el Diagrama de Piper (Figura 11-1) refleja la clasificación de las aguas según su contenido iónico. Existen distintas variantes de estos diagramas. En este caso, la metodología utilizada es la siguiente: en primer lugar los valores de concentración de iones se reducen a porcentaje de miliequivalentes por litro (meq/l) de cada catión o anión respecto del total de aniones o cationes y se representan los datos en tres diagramas poligonales:

- Un triángulo para los cationes mayoritarios, en cuyos vértices figuran: calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), y la suma de los iones sodio y potasio ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), cada uno de ellos incrementándose en el sentido horario. A cada vértice le corresponde el 100% de cada parámetro.

- Otro triángulo para los aniones mayoritarios, en cuyos vértices figuran: cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), y la suma de los iones carbonato y bicarbonato ($\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$), cada uno de ellos incrementándose en el sentido antihorario. A cada vértice le corresponde el 100% de cada parámetro.

- Y un diagrama romboidal en el que se representan la suma de los cationes ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) y ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) en un par de lados paralelos y complementarios, mientras en el otro par de lados se representa la suma de aniones ($\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$) y su complementario ($\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$).

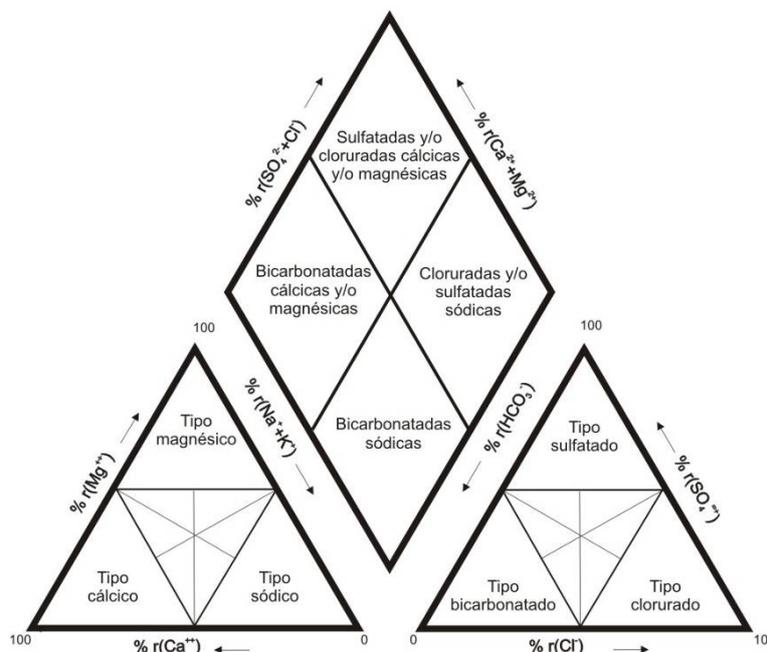


Figura 11-1.- Clasificación de las aguas según el Digrama de Piper

Diagrama de Stiff: se trata de un diagrama poligonal de ejes paralelos, en el que se representan los análisis individualmente. En este caso se utiliza el diagrama de Stiff modificado (Custodio y Llamas, 1976) que consta de tres ejes paralelos (Figura 11-2). En el sector derecho se representan las concentraciones en meq/L de los aniones (Cl^- , SO_4^{2-} y $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) y en el sector izquierdo la concentración de cationes ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Mg^{2+} y Ca^{2+}). Una vez representados los valores, la figura poligonal resultante muestra gráficamente la facies del agua.

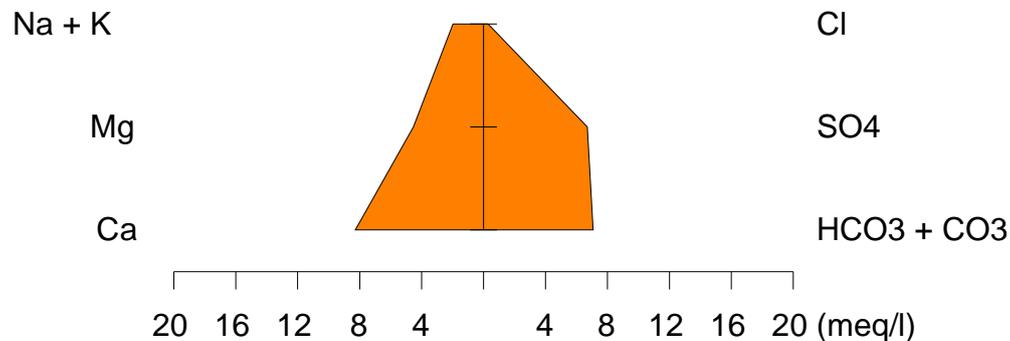


Figura 11-2.- Gráfico de Stiff

Las relaciones existentes entre iones (expresados en meq/L) contribuyen a la mejora del conocimiento hidrogeológico e hidroquímico de las aguas objeto de este estudio, ya que de su interpretación se puede obtener información sobre la naturaleza de los materiales a través de los cuales ha circulado. Además contribuyen al conocimiento de la evolución hidroquímica de las aguas así como de los posibles intercambios iónicos habidos.

Cuando el valor de una relación iónica vinculada con un tipo de materiales es próximo a la unidad se establece que ha existido circulación a través de dichos materiales y, por lo tanto, la composición química del agua presenta la misma relación entre determinados iones que los materiales por los que ha circulado.

En la Tabla 11-3 figuran las relaciones iónicas que se han calculado. Las relaciones números 1 a 3 se han utilizado a fin de establecer el tipo de materiales a través de los cuales han podido circular las aguas. Las relaciones números 4 y 5 pueden poner de manifiesto cierta influencia en el quimismo debido a la circulación del agua a través de zonas con oxidación de sulfuros. La relación nº 6 (López-Chicano *et al.*, 2001) indica si los intercambios iónicos son más o menos significativos, siendo ésta menor cuanto mayor sea el intercambio entre los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} de la roca y los iones Na^+ y K^+ del agua. El índice de intercambio catiónico (icb) (relación nº 7) orienta sobre la existencia de sustitución del sodio del agua por el calcio de la roca (Custodio y Llamas, 1976) y en menor medida por el magnesio, ya que éste presenta una mayor retención (Hem, J., 1970). El valor del icb estará más próximo a cero cuanto menor sea la intensidad con que se verifiquen los intercambios entre el sodio y el potasio, por un lado, y el calcio y el magnesio, por el otro (Catalán, 1981). Cuando existe un intercambio del sodio y del potasio del agua por el calcio y el magnesio de la roca, el agua se endurece y el índice tiende a crecer (valores positivos); en el caso contrario, cuando en el agua se produce un ablandamiento éste tiende a disminuir (Custodio y Llamas, 1976; Catalán, 1981). En aguas en las que predominan los iones Cl^- y Na^+ puede existir ablandamiento sin que el valor del icb se vea afectado, por lo que se suele calcular el icb (-) (relación nº 8), que se emplea, en general, cuando el icb es negativo (Custodio y Llamas, 1976).

Tabla 11-3.- Relaciones iónicas

Terrenos calcáreos	$\frac{r\text{HCO}_3^- + r\text{CO}_3^{2-}}{r\text{Ca}^{2+}} \quad (1)$		
Terrenos dolomíticos	$\frac{r\text{HCO}_3^- + r\text{CO}_3^{2-}}{r\text{Ca}^{2+} + r\text{Mg}^{2+}} \quad (2)$	$\frac{r\text{Mg}^{2+}}{r\text{Ca}^{2+}} \quad (3)$	
Probable oxidación de sulfuros	$\frac{r\text{HCO}_3^- + r\text{CO}_3^{2-} + r\text{SO}_4^{2-}}{r\text{Ca}^{2+} + r\text{Mg}^{2+}} \quad (4)$	$\frac{r\text{SO}_4^{2-}}{r\text{HCO}_3^-} \quad (5)$	
Intercambio iónico	$\frac{r\text{Na}^+ + r\text{K}^+}{r\text{Ca}^{2+} + r\text{Mg}^{2+}} \quad (6)$	icb: $\frac{r\text{Cl}^- - (r\text{Na}^+ + r\text{K}^+)}{r\text{Cl}^-} \quad (7)$	icb (-): $\frac{r\text{Cl}^- - (r\text{Na}^+ + r\text{K}^+)}{r\text{NO}_3^- + r\text{HCO}_3^- + r\text{SO}_4^{2-}} \quad (8)$

Por otra parte, se ha considerado de interés el cálculo de los índices de saturación a fin de establecer la estabilidad mineral de las muestras analizadas. Para ello se ha utilizado el programa PHREEQC-2, que está basado en el programa en Fortran PHREEQE (Parkhurst *et al.*, 1980) y ha sido diseñado para la realización de una amplia variedad de cálculos geoquímicos en aguas de baja temperatura. (http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/)

11.2. RESULTADOS

11.2.1. DETERMINACIONES “IN SITU”

Los parámetros determinados “in situ” en el momento de la toma de muestra son: pH, conductividad eléctrica, temperatura del agua y temperatura ambiental. Los resultados obtenidos en la campaña de red de calidad realizadas hasta la fecha figuran en la Tabla 11-4. Los valores de temperatura de las muestras están comprendidos entre 11,4 °C y 18,6 °C, los datos más bajos corresponden a los manantiales (entre 11,4 y 12,4 °C) y los más altos a los pozos mineros (16,5 y 16,8 °C). Las aguas procedentes de las bocaminas presentan valores comprendidos entre 12,3 y 13,1 °C.

La conductividad presenta valores que oscilan entre 172,7 y 2.100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabla 11-4). Las aguas procedentes de los manantiales presentan valores mucho más bajos que las que han circulado a través de las labores mineras, en general; cabe destacar que estos valores son algo más elevados en las que proceden de pozos mineros.

Los valores de pH se encuentran en todos los casos en un rango entre 5,8 y 7,5. Mientras las aguas procedentes de bocaminas presentan un rango de pH más amplio, los pozos mineros tienen valores en torno a 7 y 7,5.

Tabla 11-4.- Parámetros medidos in situ. Campaña de la red de calidad

ID IGME	NOMBRE	FECHA	pH	CE	Tªagua
1305-2-0022	Bocamina Baltasara	15/03/2009	7,1	1363	13,1
1305-2-0023	Bocamina antigua Baltasara	15/03/2009	6,8	804	13,1
1305-2-0027	Bocamina el Casar	15/03/2009	6,8	1097	13
1305-2-0045	Bocamina Vegadotos	06/04/2009	6,6	583	12,3
1305-2-0030	Fte El Campo	25/03/2009	5,8	172,7	12,4
1305-2-0039	El Somerón	03/04/2009	7,5	413	11,8
1305-6-0128	Prau Reguero II	03/04/2009	6,67	970	12,2
1305-2-0054	Polio	20/04/2009	7,02	2100	18,6
1305-2-0055	Tres Amigos	20/04/2009	7,5	1887	16,5

11.2.2. ANÁLISIS QUÍMICOS

Los resultados de los análisis químicos de las muestras tomadas durante la campaña de (marzo-abril 2009) figuran en las tablas 11.5, 11.6 y 11.7. Los parámetros minoritarios y traza no se han incluido en estas tablas, ya que serán comentados posteriormente.

Como ya se mencionó anteriormente, todos los análisis han sido realizados en el Laboratorio de CAASA situado en Lorqui, Murcia. Igual que en el apartado anterior y en consonancia con la metodología llevada a cabo, los puntos muestreados en la red de calidad han sido agrupados en tres categorías según su naturaleza: pozos mineros, manantiales y bocaminas. Los valores máximos y mínimos de los parámetros mayoritarios obtenidos para cada grupo figuran en la Tabla 11-7; los parámetros minoritarios y traza no se han incluido en estas tablas, ya que serán comentados posteriormente.

Tabla 11-5.- Resultados de los análisis químicos de las muestras tomadas durante la campaña de marzo-abril (2009) en la zona Polio – Tres Amigos

ID IGME		Fecha de toma	mg/L											
			RS	DQO	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	SiO ₂	NO ₃ ⁻
1305-2-0022	B. Baltasara	15/03/2009	903,6	3	191,23	65,99	4,08	9,28	<5	459	432	0,00	0,71	7,72
1305-2-0023	B. Antigua Baltasara	15/03/2009	600	2	147,62	40,27	1,66	9,18	<5	457	154	5,65	0,27	7,33
1305-2-0027	B. El Casar	15/03/2009	722,6	3	144,02	56,29	6,69	10,97	<5	453	242	18,83	0,04	9,05
1305-2-0045	B. Vegadotos	06/04/2009	369,2	2	50,41	24,75	2,81	9,73	<5	87	209	28,18	0,48	7,33
1305-2-0054	Pozo Polio	20/04/2009	1356	1	199,6	79,82	8,39	9,62	<5	933,8	535,5	194,9	0,05	12,43
1305-2-0055	P Tres Amigos	20/04/2009	1392	10	118,8	58,95	9,01	19,94	<5	958,8	271,8	236,2	0,08	11,5
1305-2-0030	M. Fte El Campo	25/03/2009	87,6	3	12,00	2,18	6,40	11,13	<5	13	29	6,80	11,06	5,74
1305-2-0039	M. Fte El Somerón	03/04/2009	224,8	2	53,21	16,01	1,59	9,90	<5	173,7	50,63	6,43	5,16	0,14
1305-6-0128	M. Fte Prau Reguero II	03/04/2009	1980	1	264	228,5	3,29	6,86	<5	277,2	1469	10,44	0,67	4,23

Tabla 11-6.- Resultados de los análisis químicos de las muestras tomadas durante la campaña de marzo-abril (2009) en la zona Polio – Tres Amigos.

ID IGME		mg/L								µg/L							
		NO ₂ ⁻	F ⁻	NH ₄ ⁺	S ₂ ⁻	Al	Cu	PO ₄ ³⁻	Zn	Mn	Fe	As	Cd	Hg	Pb	Se	Cr
1305-2-0022	B. Baltasara	2,44	0,12	0,13	<0,1	73,4	<0,05	0,13	65	120	390	<5	<0,5	<0,5	<5	<5	0,1
1305-2-0023	B. Antigua Baltasara	1,58	0,1	<0,05	<0,1	34,2	<0,05	0,1	52	50	80	<5	<0,5	<0,5	<5	<5	<2,5
1305-2-0027	B. El Casar	2,19	0,17	0,44	<0,1	61,8	<0,05	0,12	66	250	550	<5	<0,5	<0,5	<5	<5	0,5
1305-2-0045	B. Vegadotos	0,76	0,11	<0,05	<0,1	88,9	<0,05	0,23	93	30	70	<5	0,1	<0,5	<5	<5	0,2
1305-2-0054	Pozo Polio	4,12	0,24	1,61	<0,1	699,1	<0,05	0,42	79	340	2080	<5	<0,5	<0,5	<5	<5	0,6
1305-2-0055	P Tres Amigos	2,07	0,23	1,14	<0,1	74	<0,05	0,48	120	630	2360	17,4	<0,5	<0,5	3,6	<5	0,6
1305-2-0030	M. Fte El Campo	0,36	0,08	<0,05	<0,1	69,6	<0,05	0,08	57	20	<0,05	<5	0,1	<0,5	<5	<5	0,1
1305-2-0039	M. El Somerón	0,95	0,2	<0,05	<0,1	289	<0,05	0,25	58	20	390	<5	0,1	<0,5	<5	<5	0,5
1305-6-0128	M. Fte Prau Reguero II	3,37	0,17	<0,05	<0,1	47,8	<0,05	0,11	59	20	<0,05	<5	<0,5	<0,5	<5	<5	0,1

Tabla 11-7.- Valores máximos y mínimos de la red de calidad (campaña marzo-abril 2009)

		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	SiO ₂	RS	sulfuros
Bocamina	máximo	10,97	431,64	459,18	0,00	0,71	28,18	65,99	191,23	6,69	9,05	903,60	0,00
	mínimo	9,18	153,51	86,84	0,00	0,04	0,00	24,75	50,41	1,66	153,51	369,20	0,00
Pozo	máximo	19,94	535,49	958,80	0,00	0,08	236,15	79,82	199,63	9,01	12,43	1392,40	0,00
	mínimo	9,62	271,79	933,82	0,00	0,05	194,85	58,95	118,82	8,39	11,50	1355,80	0,00
Manantial	máximo	11,13	1469,06	277,17	0,00	11,06	10,44	228,54	264,04	6,40	5,74	1979,60	0,00
	mínimo	6,86	29,40	13,09	0,00	0,14	6,43	2,18	12,00	1,59	4,23	87,60	0,00

El cloro está presente en todas las muestras con concentraciones que oscilan entre 6,86 y 19,94 mg/L, siendo este último valor, correspondiente al Pozo Tres Amigos, considerablemente mayor que el resto. El sodio, presente en casi todas las muestras de agua, presenta mayores concentraciones en los pozos, llegando en el Pozo Tres Amigos a superar los 200 mg/L. El potasio aparece con concentraciones inferiores a 10 mg/L en todas las muestras.

La concentración de bicarbonatos es variable y depende del valor del pH (Figura 11-3). En general, la concentración es mayor en las aguas que proceden de las labores mineras que en las que lo hacen de surgencias naturales (Figura 11-4). La mayor concentración en ambas campañas se corresponde en los pozos, en los que se midieron 933,8 y 958,8 mg/L.

En general, las concentraciones más elevadas de los cationes calcio y magnesio se han obtenido en aguas procedentes de labores mineras. El magnesio presenta rangos de concentración similares en bocaminas y pozos mineros (entre 24,75 y 79,82 mg/L). Las mayores concentraciones de calcio se localizan en aguas procedentes de labores mineras (entre 50,41 y 199,6 mg/L) (Figura 11-5).

La concentración de sulfatos es superior, en general, en las aguas procedentes de las labores mineras, excepto en el caso de la fuente Prau Reguero II con valores de 1469 mg/L, relacionado posiblemente con las interacción con labores de cielo abierto. En general aprecia cierta correlación entre la concentración de sulfatos y la de bicarbonatos a excepción de la fuente Prau Reguero II (Figura 11-6).

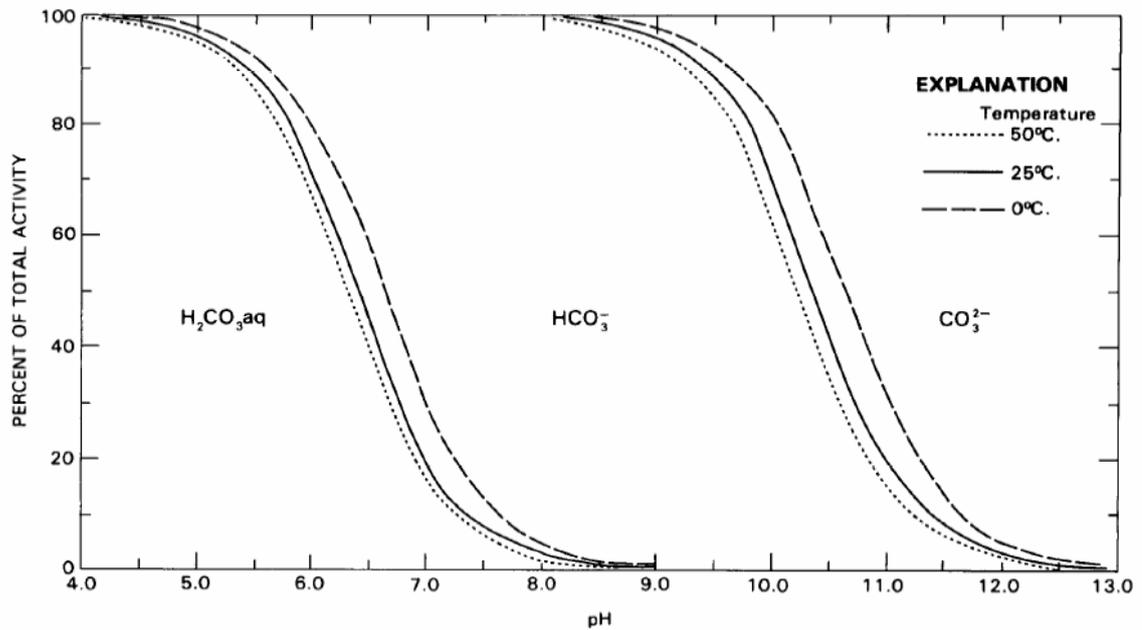


Figura 11-3.- Actividades, en porcentaje, de las especies de dióxido de carbono disueltas (1 atmósfera de presión y varias temperaturas) en función del pH (Hem, 1985)

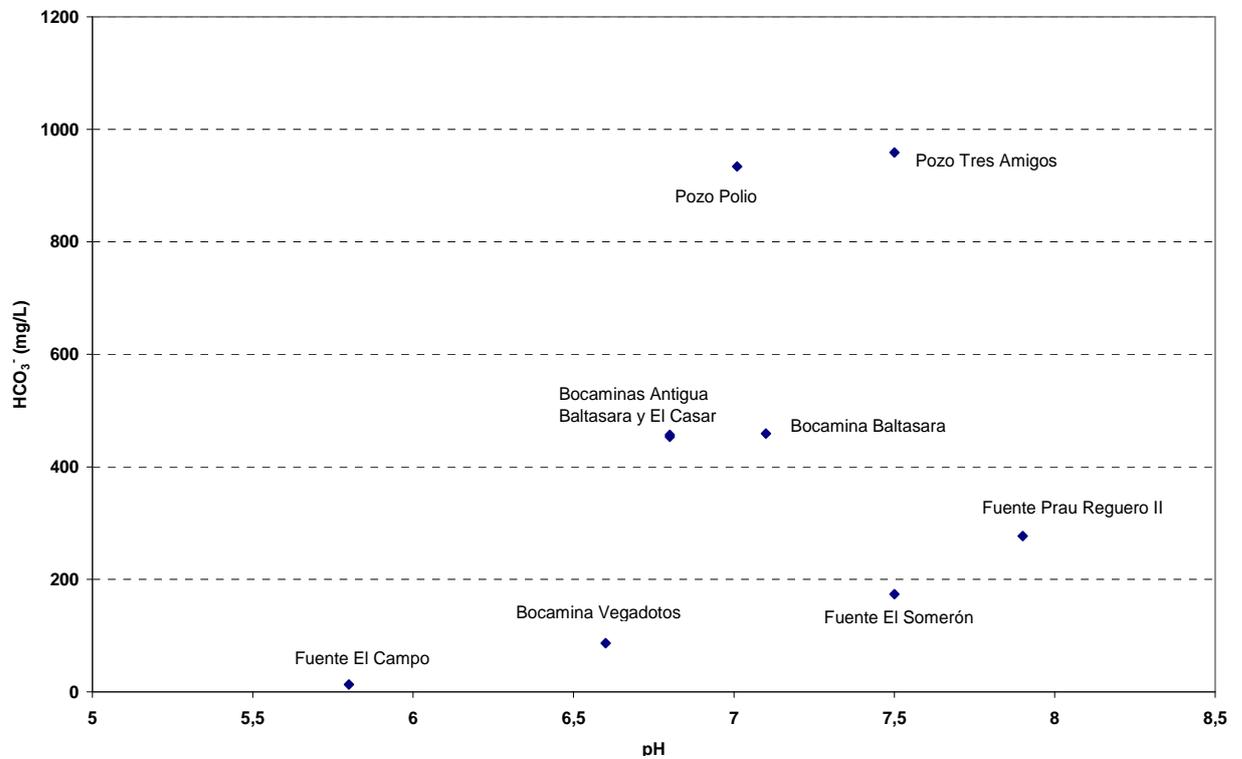


Figura 11-4.- Relación entre la concentración de bicarbonatos (mg/L) y el pH en los puntos estudiados

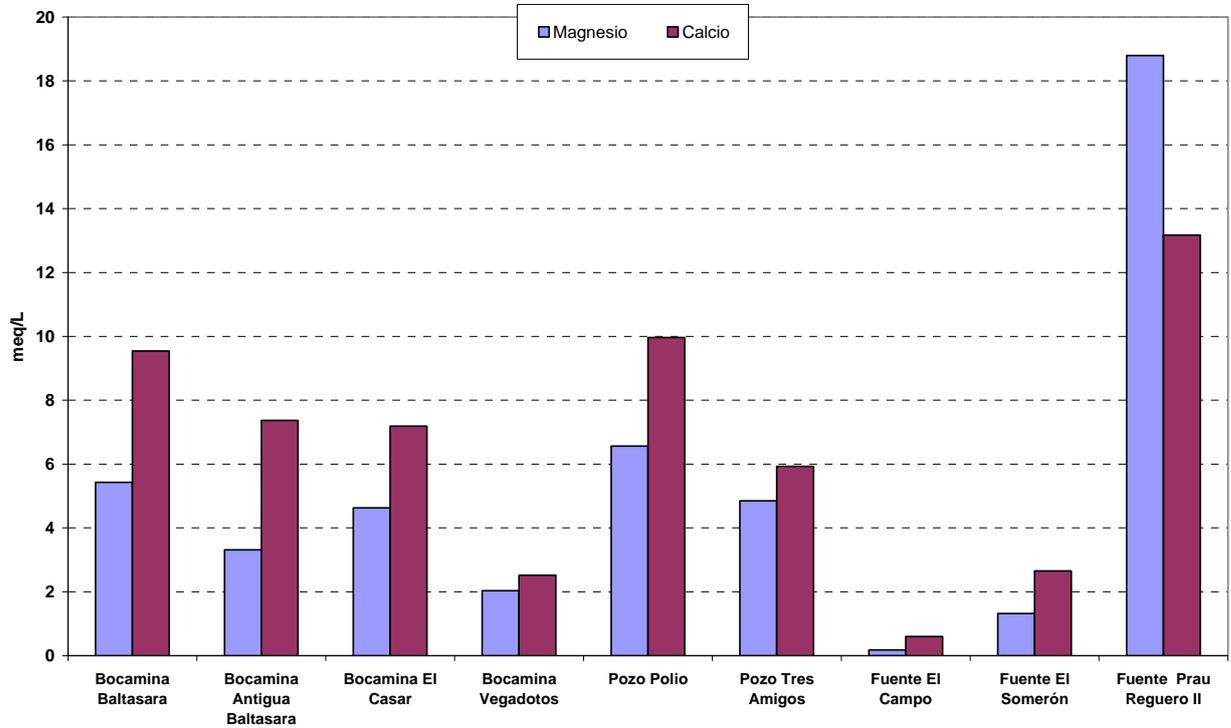


Figura 11-5.- Concentración de calcio y magnesio (meq/L) en los puntos estudiados

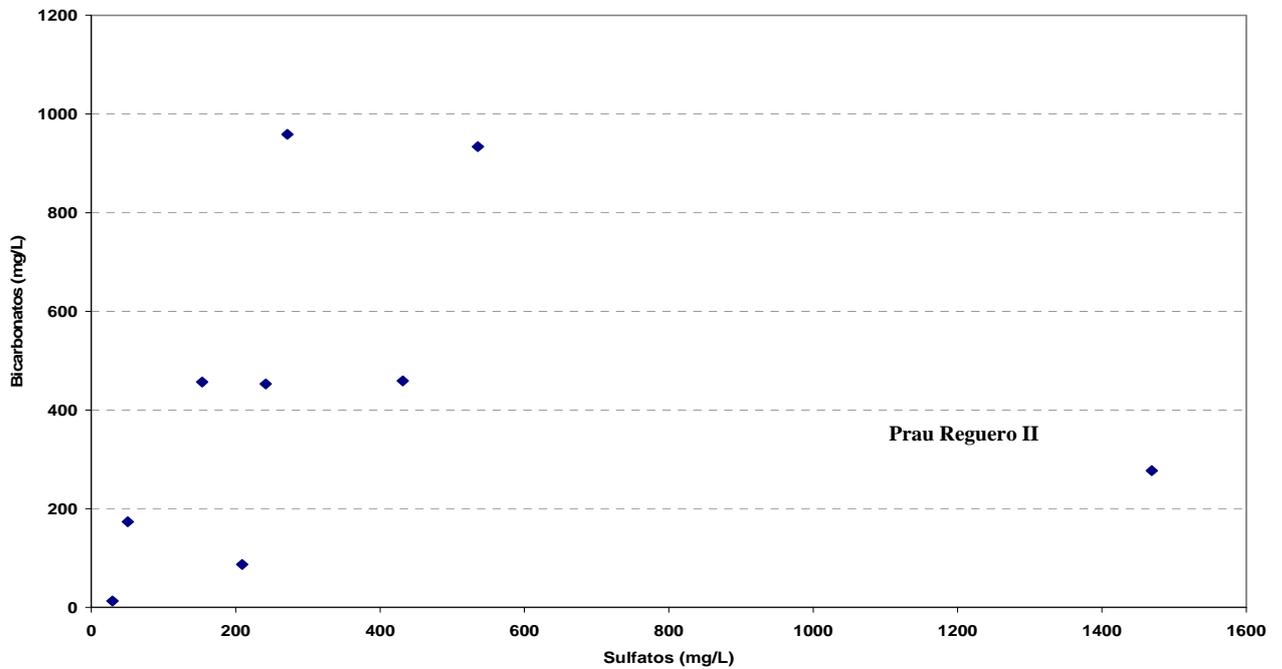


Figura 11-6.- Correlación entre las concentraciones de los aniones sulfato y bicarbonato (mg/L)

El contenido en hierro es variable, siendo mucho mayor en los pozos con valores que llegan a 2360 $\mu\text{g/L}$. En las bocaminas todas las muestras están incluidas en un rango de 70-380 $\mu\text{g/L}$. Dos de los manantiales no superan el límite de detección, mientras que el manantial correspondiente a la fuente el Somerón alcanza valores de 390 $\mu\text{g/L}$ (Figura 11-7).

Entre los elementos traza y minoritarios analizados, no presentan valores superiores a los límites de detección en ninguna muestra los siguientes: cobre, mercurio y el selenio. El cinc presenta concentraciones entre 52 y 120 mg/L , los pozos son los que presentan los mayores valores, en el plomo solamente el pozo Tres Amigos presenta valores mayores del límite de detección, 3,6 $\mu\text{g/cm}$, respecto al cromo en todos los caso, excepto en la Antigua Bocamina Baltasara se superan los límites, siendo también los valores mayores los de los pozos. El cadmio solo presenta una muestra por encima del límite de detección, en la Bocamina Vegadotos, con 0,1 $\mu\text{g/cm}$. Finalmente al arsénico no supera los límites de detección excepto en el Pozo Tres Amigos.

El arsénico que ha sido detectado en el Pozo Tres Amigos sobrepasa los límites establecidos en la legislación vigente (RD 140/2003).

El aluminio está presente en todas las muestras presentando valores entre 34,2 y 699,1 mg/L que corresponde al Pozo Polio. El fluoruro aparece también en todas las muestras con valores entre 0,08 y 0,24 mg/L , siendo los mayores los correspondientes a los pozos mineros.

El manganeso está presente en los tres tipos de aguas con concentraciones variables, los valores inferiores y homogéneos corresponde a los manantiales (20 $\mu\text{g/L}$), los mayores a los pozos, 340 y 630 $\mu\text{g/L}$ y las bocaminas con valores intermedios entre 30 y 250 $\mu\text{g/L}$ (Figura 11-7).

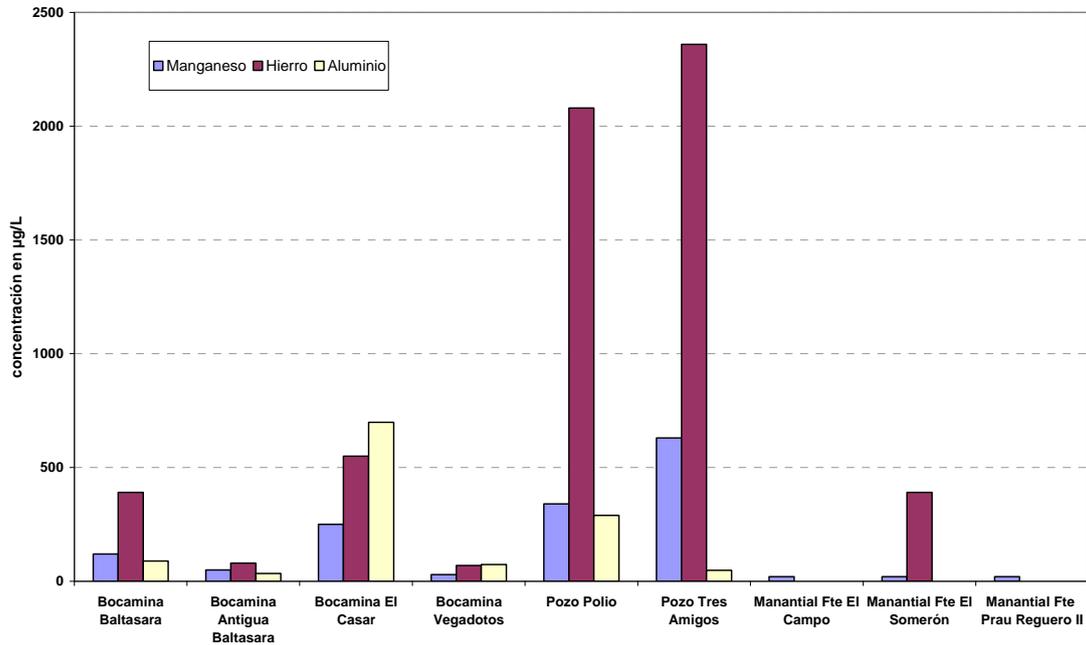


Figura 11-7.- Concentración de aluminio, manganeso y hierro en los puntos estudiados

11.2.3. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA, REPRESENTACIONES GRÁFICAS, RELACIONES IÓNICAS Y CORRELACIÓN ESTADÍSTICA

Caracterización hidroquímica

La caracterización hidroquímica de las muestras se ha realizado atendiendo a su facies hidroquímica, mineralización y dureza, según los criterios comentados en el apartado de metodología (11.1.4).

El agua procedente de los pozos mineros incluidos en la red de calidad presenta, mineralización fuerte o notable y las aguas son duras o muy duras. La facies aniónica es bicarbonatada, mientras que en facies catiónica ninguna especie supera el 50%. Todas las muestras procedentes de bocaminas presentan una mineralización notable y dureza variable entre media y muy dura. Los manantiales (El Campo, El

Somerón y Prau Reguero II) presentan, respectivamente, mineralización muy débil, ligera o fuerte según el manantial y origen del mismo, correspondiendo con dureza muy blanda, media o muy dura.

Tabla 11-8.- Caracterización hidroquímica. Campaña marzo-abril 2009

ID IGME	NOMBRE	Facies hidroquímica*		Dureza	Mineral.
1305-2-0022	B. Baltasara	sulfatada	cálcica	muy dura	notable
1305-2-0023	B. Antigua Baltasara	bicarbonatada	cálcica	dura	notable
1305-2-0027	B. El Casar	bicarbonatada	cálcica	dura	notable
1305-2-0045	B. Vegadotos	sulfatada	cálcico-magnésica	media	notable
1305-2-0054	P. Polio	bicarbonatada	cálcico-sódico-magnésica	muy dura	fuerte
1305-2-0055	P. Tres Amigos	bicarbonatada	sódico-cálcico-magnésica	dura	notable
1305-2-0030	M. Fte El Campo	sulfatada-clorurada-bicarbonatada	cálcico-sódico	muy blanda	muy débil
1305-2-0039	M. Fte El Somerón	bicarbonatada-sulfatada	cálcica	media	ligera
1305-6-0128	M. Fte Prau Reguero II	sulfatada-bicarbonatada	magnésica	muy dura	fuerte

* la ausencia de facies predominante (ninguna especie supera el 50%) se señala uniendo con un guión las facies mayoritarias

Representaciones gráficas

La representación de los análisis en el diagrama de Piper (Figura 11-8) muestra cierta agrupación de las aguas procedentes de pozos mineros en el sector central del diagrama. La distribución de las aguas que proceden de bocaminas es más variable, mientras que Antigua Baltasara y el Casar están situadas en el sector de aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, Baltasara y Vegadotos lo hacen en el sector de aguas sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas. Los manantiales presentan una situación en el diagrama diferente en cada caso, la fuente Somerón está situada próxima a las bocaminas Antigua Baltasara y el Casar, la fuente el Campo próxima a la bocamina Vegadotos y la fuente Prau Reguero II en el vértice del sector de aguas sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas. Los diagramas de Stiff elaborados para cada punto se han incluido en el mapa hidroquímico (mapa II.6) elaborado con los datos de la ambas campañas.

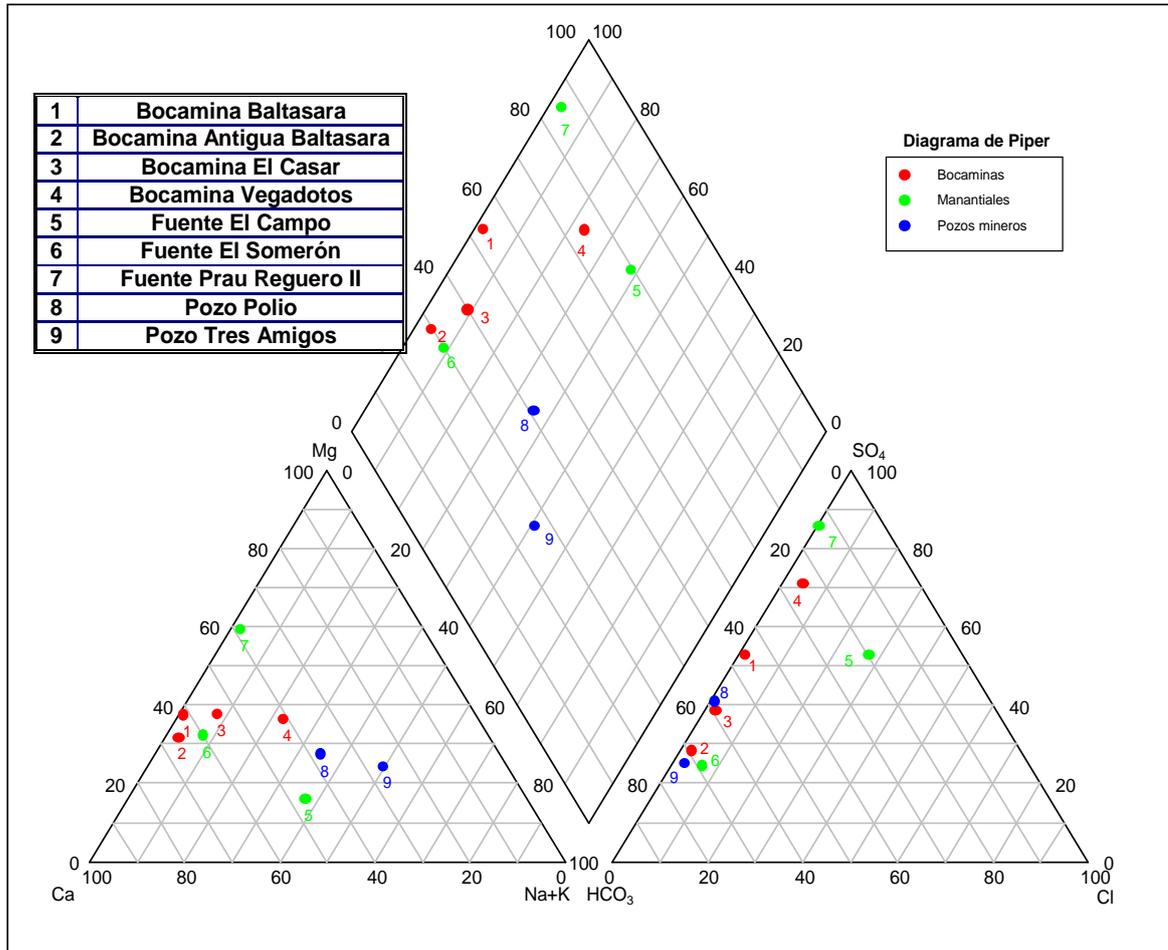


Figura 11-8.- Diagramas de Piper

Relaciones iónicas

El estudio de algunas relaciones iónicas de un agua permite mejorar la interpretación hidrogeoquímica del agua subterránea; además, aporta información sobre la existencia de procesos como la oxidación de sulfuros, la disolución de carbonatos o procesos de intercambio catiónico (Custodio y Llamas, 1983). Los valores de las relaciones iónicas calculadas se muestran en la Tabla 11-9 que siguiendo la metodología expuesta anteriormente son las que figuran en la Tabla 11-3.

Tabla 11-9.- Cálculo de las relaciones iónicas

	1	2	3	4	5	6	7	8
	$\frac{\text{HCO}_3+\text{CO}_3}{\text{Ca}}$	$\frac{\text{HCO}_3+\text{CO}_3}{\text{Ca+Mg}}$	$\frac{\text{rMg}}{\text{rCa}}$	$\frac{\text{HCO}_3+\text{CO}_3+\text{SO}_4}{\text{Ca+Mg}}$	$\frac{\text{rSO}_4}{\text{rHCO}_3}$	$\frac{\text{rNa+rK}}{\text{rCa+rMg}}$	icb	idd
B. Baltasara	0,79	0,50	0,57	1,10	1,19	0,007	0,60	0,01
B. Antigua Baltasara	1,02	0,70	0,45	1,00	0,43	0,027	-0,11	0,00
B. El Casar	1,03	0,63	0,64	1,05	0,68	0,084	-2,20	-0,05
B. Vegadotos	0,56	0,31	0,81	1,27	3,06	0,285	-3,73	-0,18
P. Polio	1,54	0,93	0,66	1,60	0,73	0,526	-31,02	-0,32
P. Tres Amigos	2,65	1,46	0,82	1,98	0,36	0,974	-17,67	-0,47
M. Fte El Campo	0,36	0,27	0,30	1,06	2,85	0,590	-0,46	-0,14
M. Fte El Somerón	1,07	0,72	0,50	0,98	0,37	0,081	-0,15	-0,01
M. Prau Reguero II	0,34	0,14	1,43	1,10	6,73	0,017	-1,78	-0,01

Las relaciones que hacen referencia al equilibrio con litologías calcáreas y dolomíticas indican una mayor presencia de las primeras en las aguas que proceden de bocaminas, a excepción de bocamina Vegadotos. En las aguas que proceden de manantiales, únicamente la Fuente el Somerón presenta un valor próximo a 1 en la relación (1). En los pozos mineros esta relación presenta valores superiores a la unidad en las dos muestras analizadas. El Pozo Tres amigos presenta un valor próximo a la unidad que denota una estabilidad mayor con terrenos dolomíticos. La relación (3), que se considera indicativo de disolución de litologías dolomíticas, muestra valores muy variables: únicamente presentan un valor entre 0,8 y 1,2 la bocamina Vegadotos y el Pozo Tres amigos, en el resto el valor es siempre inferior a 0,8 a excepción de la Fuente Prau Reguero que es mayor.

Las relaciones (4) y (5) hacen referencia a la oxidación de sulfuros. Mientras que las diferencias observadas en los valores de la relación (4) entre los distintos grupos de aguas consisten en valores más elevados en las aguas procedentes de los pozos y en la Bocamina Vegadotos, en lo que respecta a la relación (5) el valor obtenido varía considerablemente en las muestras analizadas, presentando valores elevados (> 2,5) las fuentes Prau Reguero II y el Campo y la bocamina Vegadotos y valores bajos (<0,5) la Fuente de Somerón, el Pozo Tres Amigos y la Bocamina Antigua Baltasara.

Las relaciones que estudian la presencia de intercambios catiónicos (n^{os} 6, 7 y 8) reflejan que existe una gran diferencia entre las aguas procedentes de los pozos mineros, con valores de icb comprendidos entre -15 y -32, y las procedentes de las bocaminas y manantiales labores mineras, en las que dicho índice presenta valores menos negativos o incluso positivo como en la bocamina Baltasara.

11.2.4. ESTABILIDAD MINERAL

Los cálculos referentes a la estabilidad mineral se hicieron utilizando la base termodinámica PHREEQC-2, que constituye una modificación de Parkhurst (1980). Si bien se han incluido en los cálculos un amplio número de especies minerales, se exponen únicamente aquellas en las que se han obtenido valores positivos en alguna de las muestras. En estado de equilibrio el valor del índice de saturación es igual a 0, valores positivos indican sobresaturación y valores negativos, subsaturación.

El estado de saturación respecto a calcita, dolomita, aragonito, siderita y rodocrosita se muestra en la Figura 11-9. Todos los manantiales y bocaminas están subsaturados respecto a estas especies, excepto la Fuente de Fuexo y la Bocamina Baltasara, que se encuentran sobresaturadas (índice de saturación >1) en aragonito, dolomita y calcita. El agua de los dos pozos analizados se encuentra sobresaturada en la mayoría de estas especies. Respecto a los minerales arcillosos (Figura 11-10), todas las muestras están sobresaturadas en caolinita, illita y montmorillonita. Respecto a los filosilicatos estudiados (Figura 11-11) todas las muestras analizadas, excepto la Fuente Prau Reguero II, están subsaturadas en talco y clorita. Y únicamente los pozos estudiados y las bocaminas El Casar y Baltasara están sobre saturadas en feldespatos potásico. Todas las muestras analizadas están sobresaturadas, en mayor o menor medida en goethita, gibsita y hematites (Figura 11-12).

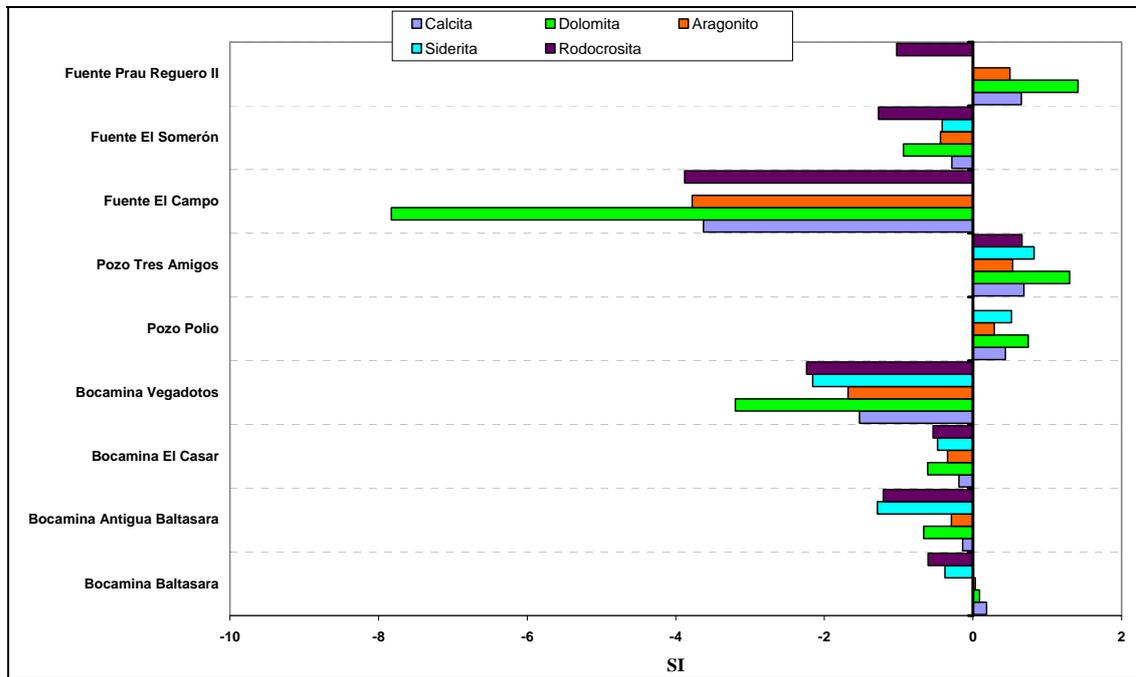


Figura 11-9.- Diagramas de estabilidad mineral respecto calcita, dolomita, aragonito, siderita y rodrocrosita

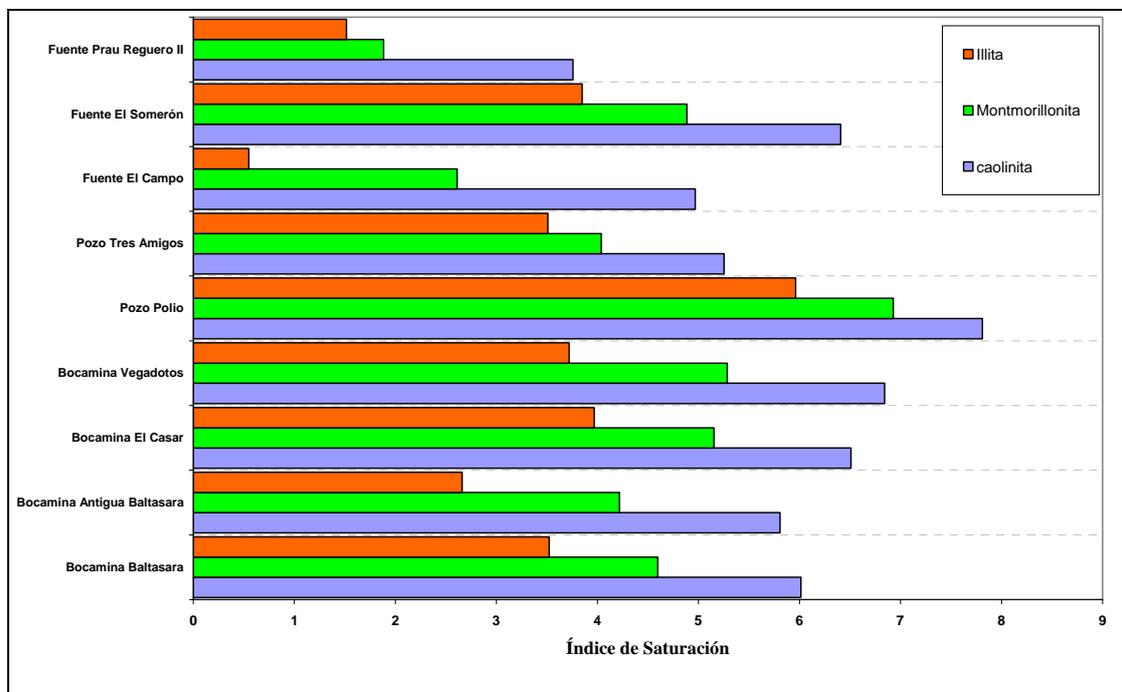


Figura 11-10.- Diagramas de estabilidad mineral respecto calcita Illita, Montmorillonita y Caolinita

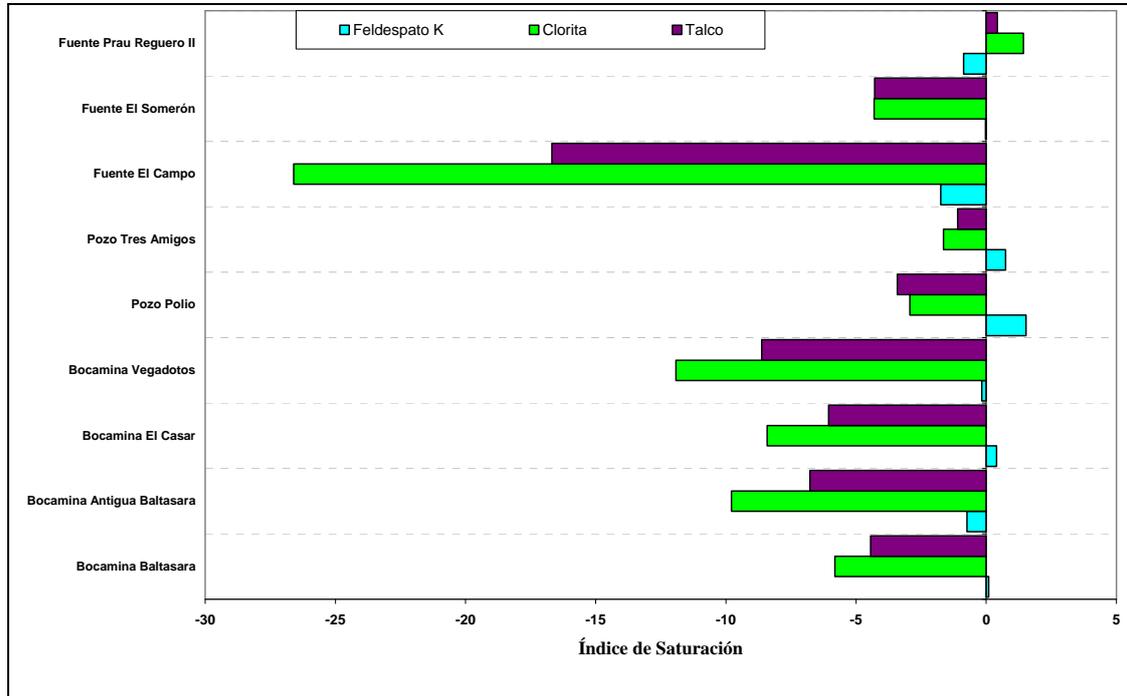


Figura 11-11.- Diagramas de estabilidad mineral respecto talco, clorita y feldespato potásico.

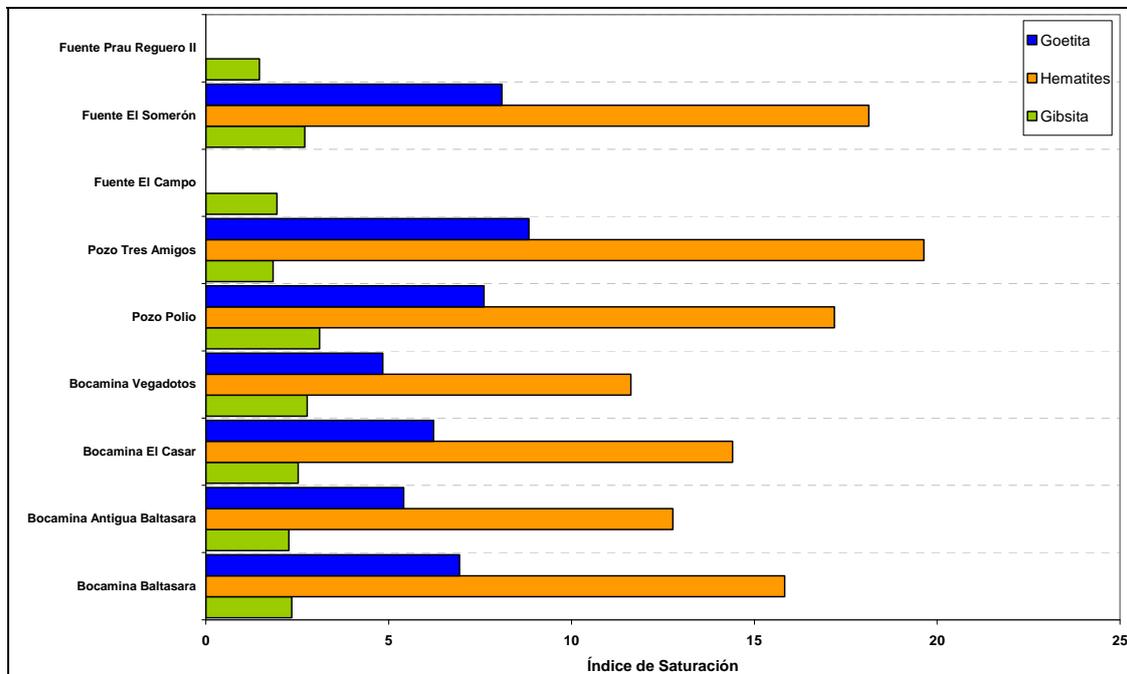


Figura 11-12.- Diagramas de estabilidad mineral respecto goethita, gipsita y hematites.

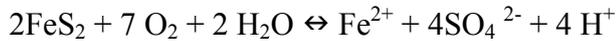
11.3. INTERPRETACIÓN HIDROQUÍMICA

La interpretación hidroquímica del agua presente en el sistema hídrico se ha realizado siguiendo la metodología establecida, es decir, atendiendo al origen de la muestra, ya que según su procedencia el recorrido del agua es diferente, como ya se ha indicado anteriormente. Los manantiales analizados corresponden a descargas de niveles permeables de litología siliclástica o calcárea, predominantemente, por lo que la circulación del agua es presumiblemente lenta, con un elevado tiempo de retención. El agua de bocamina se corresponde con el agua que circula a través de las labores de minería de montaña, con un recorrido relativamente rápido, y el agua muestreada en los pozos mineros procede de los bombeos realizados en la minería subterránea, denominada en ocasiones de fondo de valle. La diferencia principal entre los dos últimos grupos consiste en que las labores de montaña son más antiguas, por lo que el tiempo de “lavado” de los materiales ha sido mayor y el recorrido del agua teóricamente es menor mientras que las labores de fondo de valle han sido las últimas en explotar y el agua se bombea desde las plantas más profundas.

El agua procedente de manantiales presenta una composición química acorde con las litologías presentes en la zona de estudio. En general, se trata de aguas bicarbonatadas con presencia de sulfatos en mayor o menor concentración. El origen de estos sulfatos podría establecerse en la oxidación de los sulfuros contenidos en las rocas por las que circula el agua, siendo la Fuente Prau Reguero II la que presenta una mayor concentración de este anión. Además en esta fuente el valor de la relación sulfatos-bicarbonatos es mucho más elevada que en el resto de las muestras estudiadas.

Aunque la pirita es el sulfuro más abundante, existen otros sulfuros metálicos que pueden ser oxidados en condiciones ambientales similares, como marcasita, pirrotina, calcopirita, arsenopirita, esfalerita, etc. El proceso de oxidación de la pirita consta de las siguientes etapas (Galán, 2003):

Etapa I: la pirita se oxida en condiciones aerobias según la reacción:



En esta etapa inicial, el medio rocoso dispone de suficiente alcalinidad para neutralizar la acidez, de forma que el agua es neutra y precipita hierro en forma de hidróxido férrico:



El agua de drenaje en esta etapa se caracteriza por bajos contenidos en hierro y elevadas concentraciones de sulfatos; si progresa la oxidación de la pirita y se agotan los minerales neutralizantes, aumenta la generación de ácido y el pH disminuye pasando el proceso a la Etapa II. Esta etapa se caracteriza por valores de pH comprendidos entre 2,5 y 4,5, valores que no han sido medidos en ninguna de las muestras analizadas.

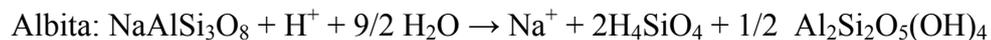
Cuando los hidrogeniones liberados por las reacciones de oxidación interaccionan con las fases alcalinas que acompañan a los sulfuros se produce una secuencia de reacciones de neutralización (Galán, 2003). Por lo tanto, el poder de neutralización depende de la naturaleza y abundancia de minerales alcalinos presentes en el medio natural. Los minerales que tienen mayor poder de neutralización son los carbonatos, debido a su elevada actividad química. La neutralización de la acidez es un proceso relativamente rápido con capacidad de tamponamiento a corto plazo, gracias a la rápida disolución de los carbonatos en las aguas que han circulado por labores mineras. En general, la velocidad de disolución relativa disminuye conforme a la siguiente secuencia:

calcita > dolomita ≈ ankerita > siderita.

Las reacciones de disolución de la calcita y dolomita en medio ácido pueden escribirse:



Según estas reacciones, hacen falta 2 moles de calcita o dolomita para neutralizar 1 mol de pirita. Además de la disolución de la calcita, la alteración de minerales aluminosilicatados también constituye una fuente de consumo de acidez; sin embargo, la velocidad de disolución es mucho más lenta que en el caso de la calcita. Se muestra a continuación algún ejemplo de reacciones de alteración para silicatos primarios (Younger *et al*, 2002).



Como consecuencia de la alteración de los materiales, el agua procedente de las labores mineras arrastra tres componentes mineralógicos: la carga sólida (partículas en suspensión, que corresponden realmente a minerales), coloides (que corresponden a precursores de minerales arcillosos u oxidados, que pueden flocular a partir de este componente), e iones en disolución, que pueden precipitar en forma de compuestos minerales si cambian las condiciones físico-químicas del agua portadora (http://www.uclm.es/users/higuera/MGA/Tema00_Intro.htm).

La carga sólida está compuesta por granos minerales entre los que predominan los minerales de la arcilla que pueden presentar propiedades de adsorción: determinados iones son capaces de ser fijados por estas partículas, con lo que al

depositarse incorporan estos iones al sedimento correspondiente. Una vez en el mismo, la físico-química de las aguas puede favorecer la retención o movilidad de estos iones. Los parámetros que regulan el sistema son: la salinidad, el potencial redox (Eh), y el pH; el incremento de la salinidad influye en la competencia entre metales pesados y metales de los grupos I y II, por los sitios de ligazón (p.ej., espaciado interlaminar en las arcillas), lo que se traduce en la expulsión de los metales pesados, y su devolución a la columna de agua; un aumento del Eh genera la inestabilidad de los compuestos reducidos (e.g., sulfuros), que ocasiona el paso del metal a la disolución; el descenso del pH tiene dos efectos: 1) induce la disolución de otros sulfuros y 2) aumenta la solubilidad de los metales disueltos (Figura 11-13).

Las aguas procedentes de labores mineras, tanto de valle como de montaña, presentan un pH próximo a la neutralidad, lo que indica que existe en el medio suficiente alcalinidad para neutralizar la acidez que se produce por la oxidación de los sulfuros presentes (Tabla 11-4). La alteración de minerales alcalinos debido al consumo de acidez libera cationes como calcio, magnesio o sodio, que en ocasiones están presentes en elevadas concentraciones (concentración de sodio en los pozos Polio y Tres Amigos: 190-240 mg/L), además de bicarbonatos o carbonatos. También se pone de manifiesto el hecho de que la mayoría de estas aguas estén sobresaturadas en minerales alcalinos. La alteración de sulfuros libera iones metálicos como hierro y manganeso, que pueden permanecer en solución o precipitar específicamente como minerales oxidos-hidróxidos ($\text{Fe}(\text{OH})_3$, entre otros). También se debe destacar el hecho de que en el rango de pH en el que se encuentran las aguas la solubilidad de los metales pesados es reducida (Figura 11-13), hecho que explicaría la baja concentración de los mismos. La movilidad de los iones metálicos está críticamente condicionada por el pH, que depende a su vez de la alcalinidad-acidez del agua; por lo tanto, ligeras variaciones en las condiciones ambientales pueden ocasionar movilidad (redisolución) o fijación (precipitado) de metales como el hierro o el manganeso (Figura 11-14).

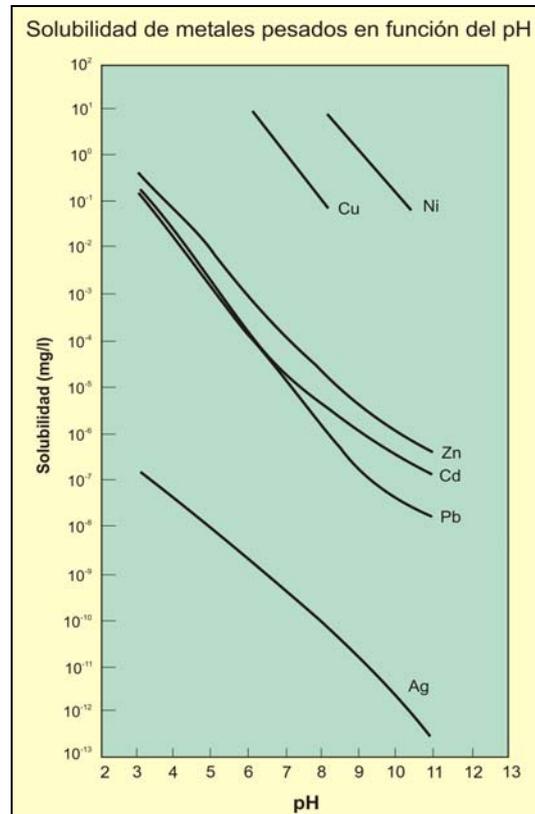


Figura 11-13.- Solubilidad de algunos metales pesados en función del pH
(<http://www.uclm.es/users/higueras/MAM/MMAM3.htm>).

En las aguas procedentes de manantiales también tienen lugar procesos de oxidación de sulfuros metálicos presentes en el medio y neutralización a partir de minerales alcalinos, si bien son menos importantes, por lo tanto, la concentración de sulfatos y bicarbonatos es menor, en general, así como la de los cationes calcio, magnesio y sodio, a excepción del Manantial Prau Reguero II. La procedencia del hierro y manganeso presentes en el agua tiene su origen en dichos procesos. El manantial en el que se aprecia mayor similitud con las aguas procedentes de las labores mineras es el Manantial Prau Reguero II, que, debido a que surge en un cielo abierto, podría estar influenciada por la presencia de galerías relacionadas con dicha explotación, o con los materiales que forman la escombrera.

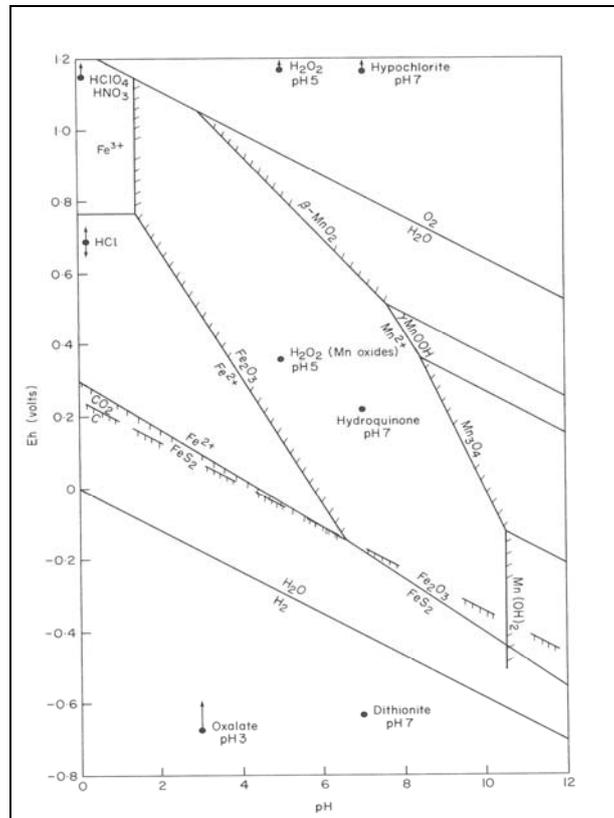


Figura 11-14.- Diagrama de estabilidad de óxidos de hierro, óxidos de manganeso, piritita y materia orgánica (C), en función del Eh y pH. Las fases sólidas son estables en las líneas sombreadas con finos trazos (Rose *et al.*, 1979).

Otro aspecto que se considera interesante comentar es la presencia de arsénico en el Pozo Tres Amigos. Existen varios mecanismos de incorporación del arsénico de origen natural a las aguas: a) oxidación de sulfuros; b) disolución de óxidos y oxihidróxidos de Fe y Mn en condiciones ácidas; c) desorción en condiciones oxidantes a pH alto; d) desorción y disolución de óxidos y oxihidróxidos relacionados con cambios a condiciones reductoras; e) desorción por reducción de superficie específica en la fase sólida; f) desorción por reducción en la carga de superficie de la fase sólida (Lillo: <http://www.escet.urjc.es/~jllillo/proyectos.html>). Probablemente sean los dos primeros los que podrían liberar el arsénico en el caso que nos ocupa. Por otra parte, se debe considerar que el estado de oxidación del arsénico, y por tanto su movilidad, están controlados fundamentalmente por las condiciones redox (potencial

redox, Eh) y el pH (Figura 11-15). La existencia de altas concentraciones de arsénico de origen natural en las aguas está controlado por tres factores: la fuente primaria de arsénico (geosfera y atmósfera), los procesos de movilización/retención de arsénico en la interacción entre la fase sólida y la fase líquida, y el transporte de arsénico como especie acuosa en el seno del agua. Los dos procesos geoquímicos que controlan la movilización de arsénico al agua son: reacciones de adsorción-desorción y reacciones de coprecipitación-codisolución.

Tanto los arsenitos [As(III)] como los arsenatos [As(IV)] son adsorbidos en la superficie de una gran variedad de materiales presentes en el medio, como son los óxidos de hierro, manganeso y aluminio. También pueden ser adsorbidos por arcillas y materia orgánica. La desorción del arsénico adsorbido en la fase sólida está condicionada por los cambios en el pH, la ocurrencia de reacciones redox (reducción/oxidación), la presencia de iones competitivos y los cambios en la estructura cristalina de la fase sólida. Las reacciones de coprecipitación-codisolución están controladas por el pH, temperatura, estado redox y concentración de especies acuosas de la solución. Por lo tanto, las variaciones en las concentraciones de arsénico en las aguas muestreadas están condicionadas por numerosos factores, siendo los principales a tener en cuenta, las condiciones redox y el pH.

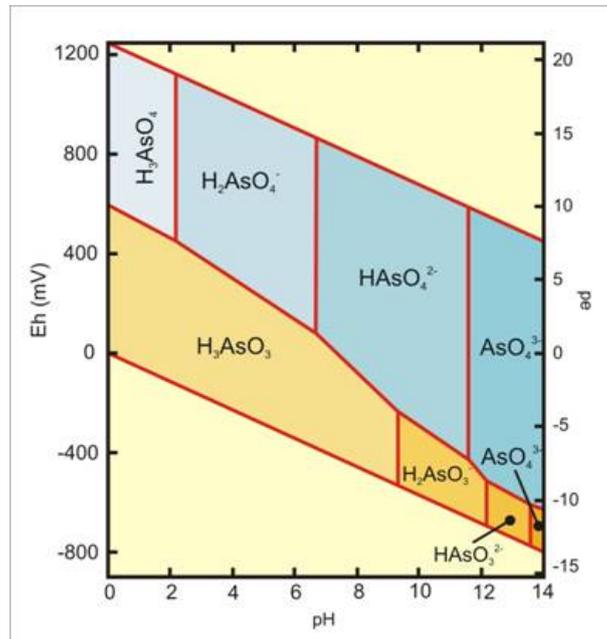


Figura 11-15.- Diagrama Eh-pH de especies acuosas de arsénico en el sistema As-O₂-H₂O a 25°C y 1 bar de presión total (Brookins, 1988)

11.4. EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS POZOS POLIO Y TRES AMIGOS

El estudio de la evolución de algunos parámetros indicativos de la calidad de las aguas de vertido en los pozos Polio y Tres Amigos ha sido posible gracias a los datos facilitados por el Departamento de Medio Ambiente del Grupo HUNOSA. Se dispone de datos de la calidad del agua de vertido del Pozo Polio, con frecuencia variable, desde enero de 1998 y de las aguas de vertido del Pozo Tres Amigos desde julio de 1997.

En el Pozo Polio la conductividad eléctrica del agua se mantiene en el rango aproximado de 1500 a 2200 μ S/cm, salvo una excepción, en mayo de 2005 (Figura 11-16). A partir del año 2004 la conductividad es ligeramente más elevada que en años anteriores. En el gráfico de la figuras Figura 11-17 y Figura 11-18 se ha

representado la precipitación en el mismo periodo (mensual y según años hidrológicos, respectivamente), en ellas se puede observar que el volumen de precipitación es menor los años anteriores a 2004, iniciándose un periodo más húmedo a partir de dicha fecha. Un mayor volumen de precipitación podría haber ocasionado un mayor lavado y arrastre de los materiales, y por lo tanto un aumento en la concentración de las sustancias disueltas. En la Figura 11-19 se han representado los datos disponibles (periodo diciembre 1997-abril 1999) de las concentraciones de hierro y sulfatos junto con los datos de pH y conductividad eléctrica, en ella se puede apreciar que existe cierta relación en la evolución de los parámetros conductividad y concentración en sulfatos, como cabría esperar en este tipo de aguas. El pH presenta una tendencia ligeramente descendente pero siempre en valores próximos a la neutralidad y la concentración de hierro es variable en el tiempo con un máximo de 14,3 mg/L en julio de 1998.

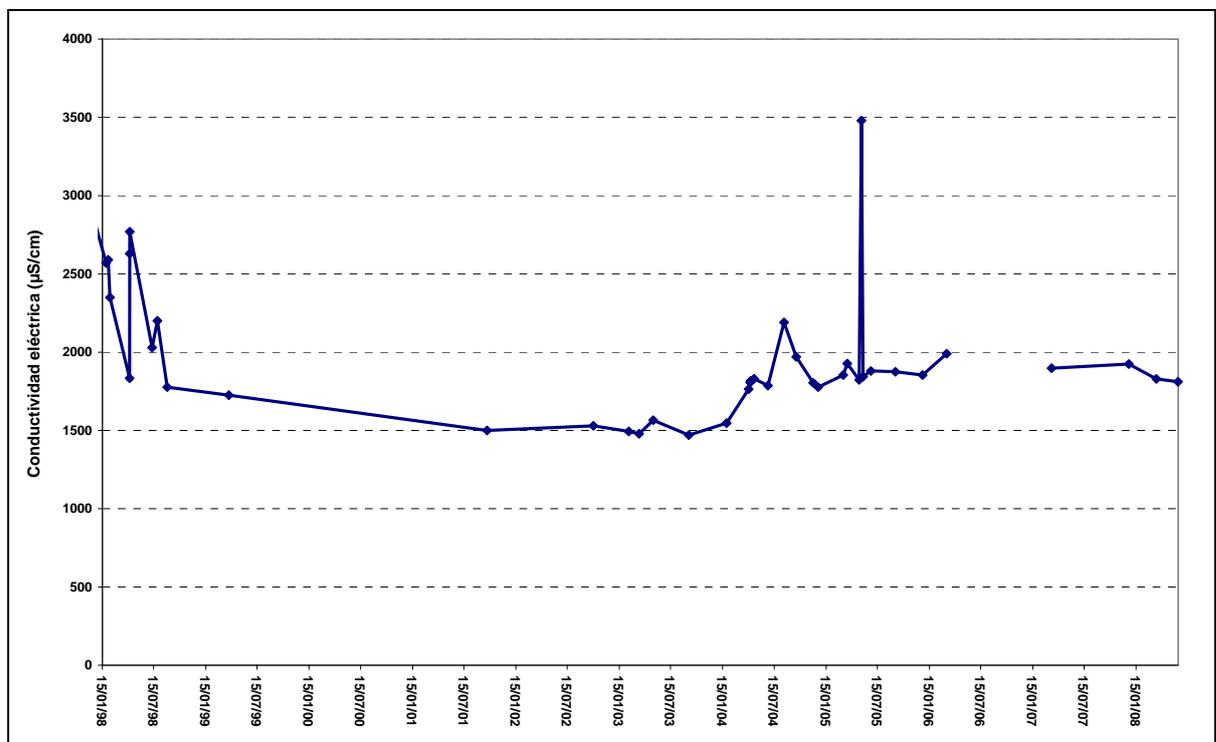


Figura 11-16. Evolución de la conductividad en el periodo enero-98 a enero-08.

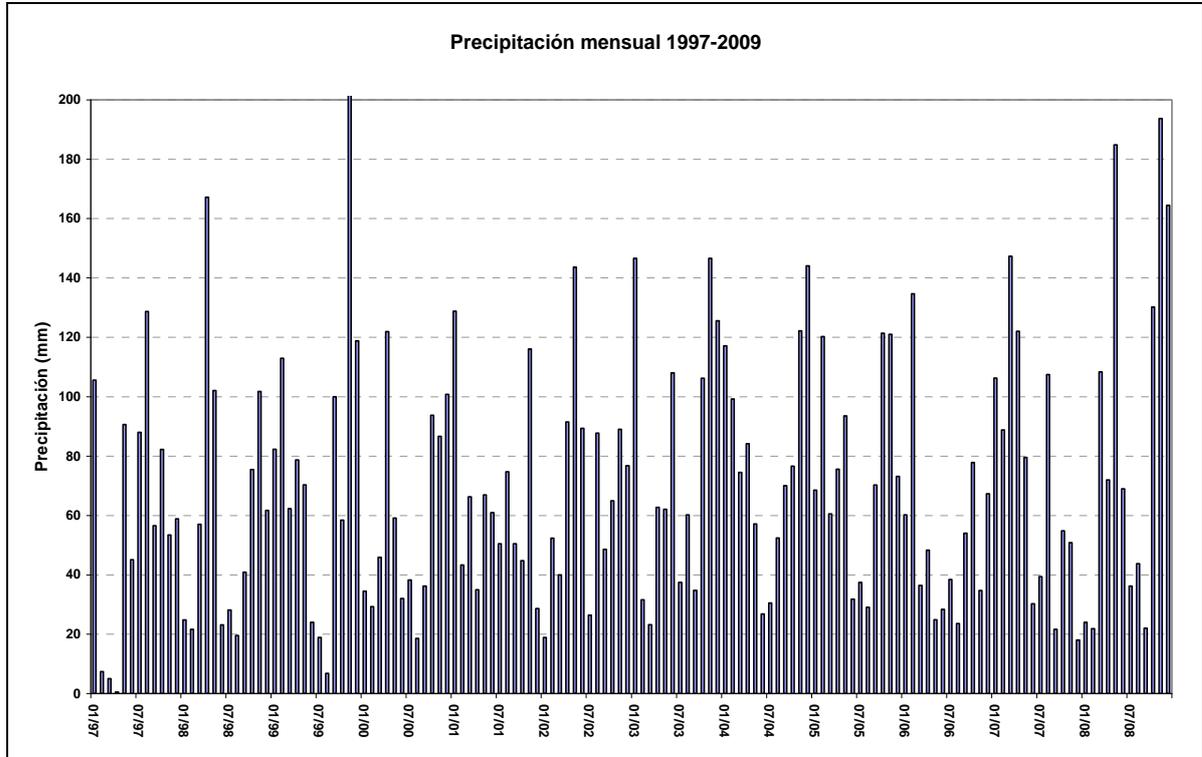


Figura 11-17. Precipitación mensual periodo 1997-2008

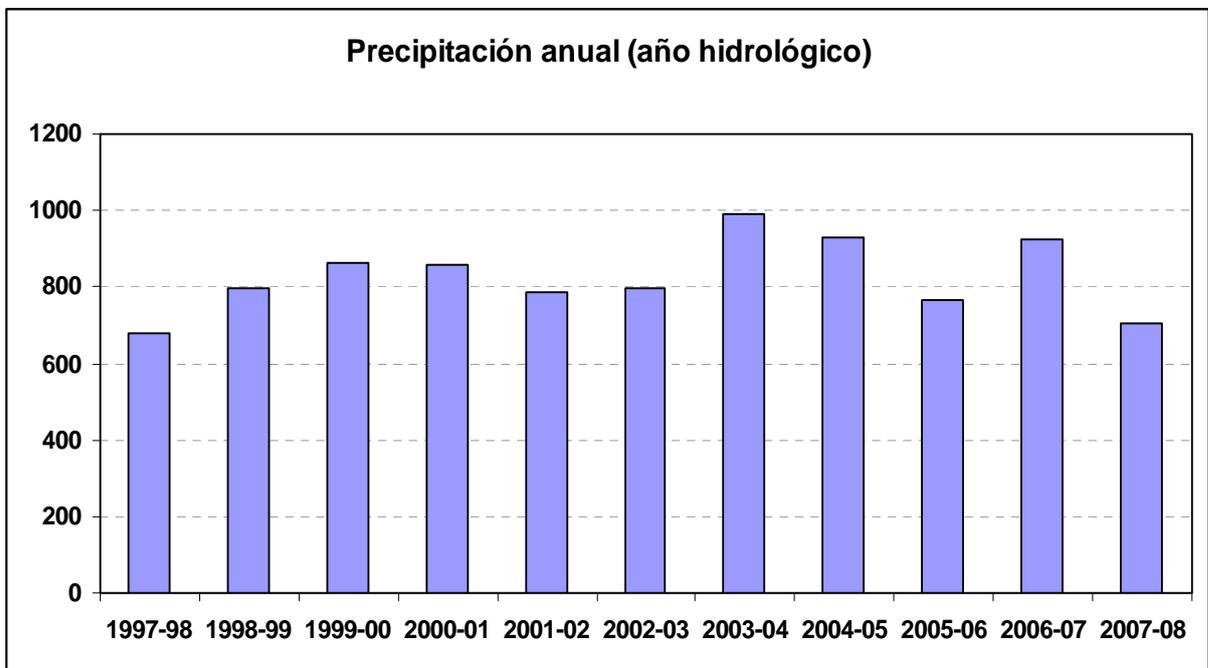


Figura 11-18. Precipitación anual periodo 1998-2008

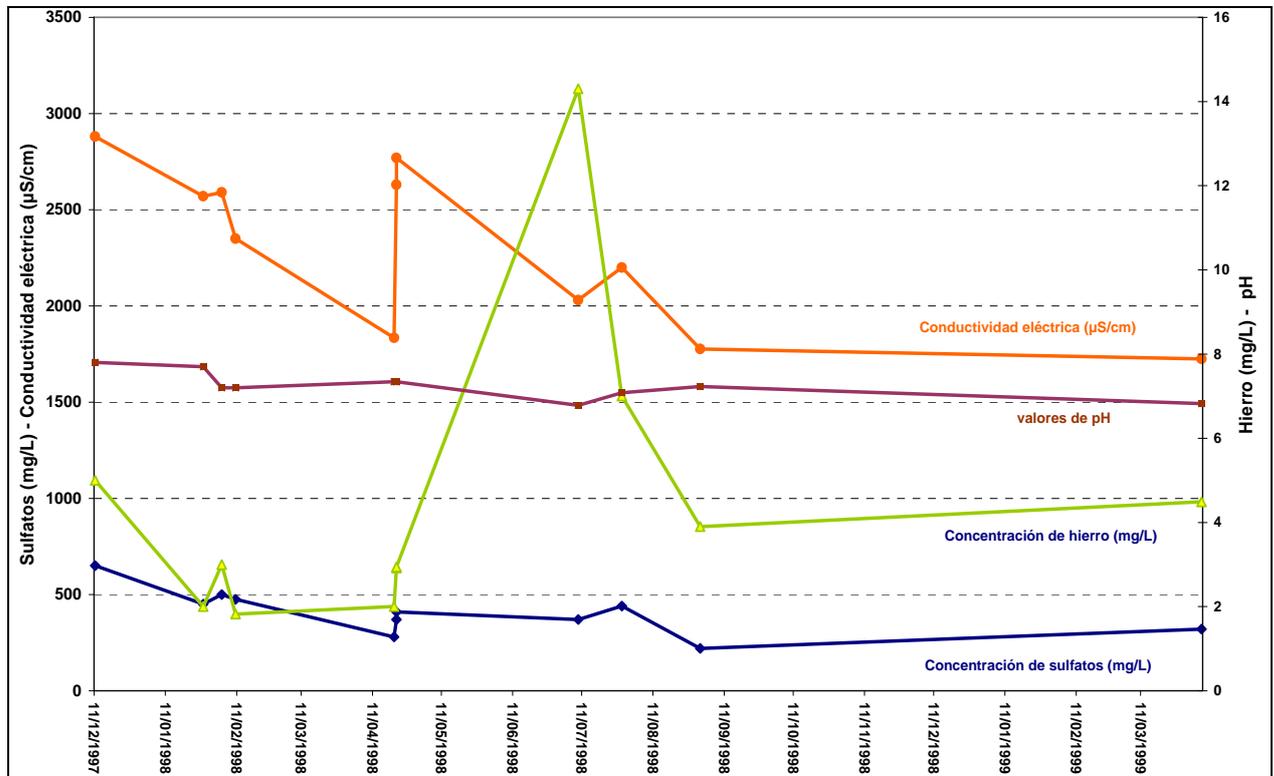


Figura 11-19.- Evolución de los parámetros: pH, conductividad eléctrica y concentraciones de sulfatos y hierro, en el Pozo Polio (diciembre 1997-marzo 1999).

En el Pozo Tres Amigos se observa (Figura 11-20) una tendencia descendente en los valores de conductividad y de concentración de hierro desde el año 2005, presentando ambos parámetros una evolución similar. A partir de marzo de 2005 no se disponen de datos de sulfatos, durante el periodo controlado se observa un aumento hasta marzo de 2003 y después un descenso progresivo hasta los últimos datos disponibles.

La evolución del agua de mina en estos pozos muestra que no se han producido aguas ácidas, sino que el pH se ha mantenido constante durante todo el periodo estudiado, de lo que se desprende, como ya se había mencionado anteriormente, que se está produciendo una atenuación natural, debido a la presencia de minerales alcalinos. Esta atenuación es muy efectiva, y tiene como resultado que el agua de mina no presente valores de pH ácidos típicos en otras explotaciones de

carbón. Además las concentraciones de hierro y sulfatos no presentan valores excesivamente elevados.

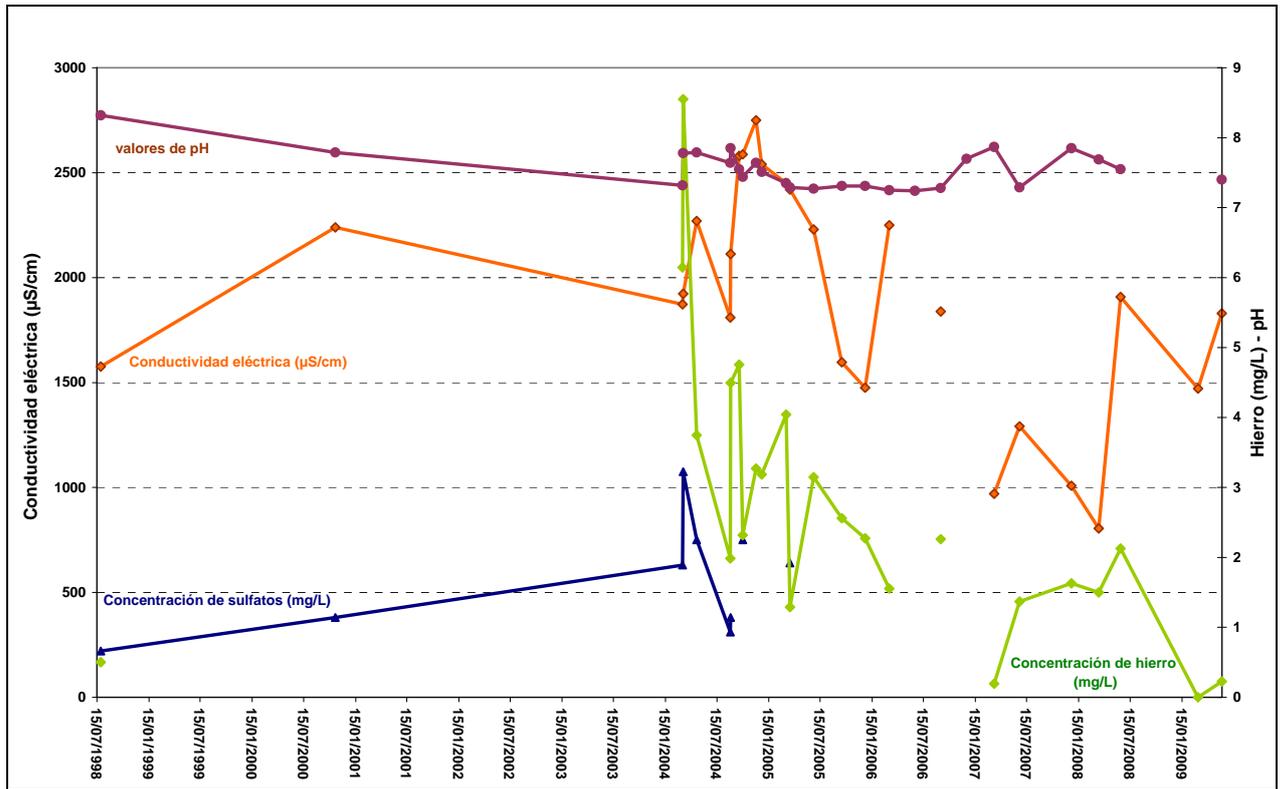


Figura 11-20.- Evolución de los parámetros: pH, conductividad eléctrica y concentraciones de sulfatos y hierro, en el Pozo Tres Amigos (julio 1998-enero 2009).

12. PROCESO DE INUNDACIÓN

12.1. ESTUDIO DEL PROCESO DE INUNDACIÓN DEL POZO POLIO

El cese de bombeo en el pozo Polio tuvo lugar en enero de 1996. A partir de enero de 1997 el departamento de Medio Ambiente del Grupo HUNOSA ha llevado a cabo el control periódico del nivel de agua en la caña pozo hasta el año 2002, cuya evolución se ha representado en la gráfica de la Figura 12-1. En la Figura 12-2 se muestra la evolución del nivel durante el año 1997; la cota de agua en el pozo, totalmente inundado, a principios de año estaba en 258 m s.n.m. Las variaciones de nivel observadas a durante dicho año muestran un ascenso de nivel hasta marzo, un descenso hasta octubre-noviembre y un nuevo ascenso hasta que comienza de nuevo el bombeo. Estas oscilaciones de nivel han sido comparadas con los valores de precipitación Figura 12-3 y de lluvia útil Figura 12-4 del mismo periodo, y se ha podido determinar, como cabría esperar, que existe una clara correlación entre las variaciones de nivel y el volumen de precipitación. A partir de la correlación entre la lluvia útil y la evolución de nivel se ha establecido un tiempo de retardo de aproximadamente 4 meses.

Debido a que el nivel de agua estaba a una cota considerablemente superior a la cota de conexión con Samuño (137 m s.n.m.), se decidió, por motivos de seguridad, la instalación de una bomba y mantener el nivel de agua a una cota inferior a la de conexión; este bombeo comenzó el 13 de noviembre de 1997, alcanzándose el nivel de seguridad a finales de año (Figura 12-2.-) y continúa hasta el día de hoy con algunas paradas debidas al funcionamiento de la bomba, entre otras causas.

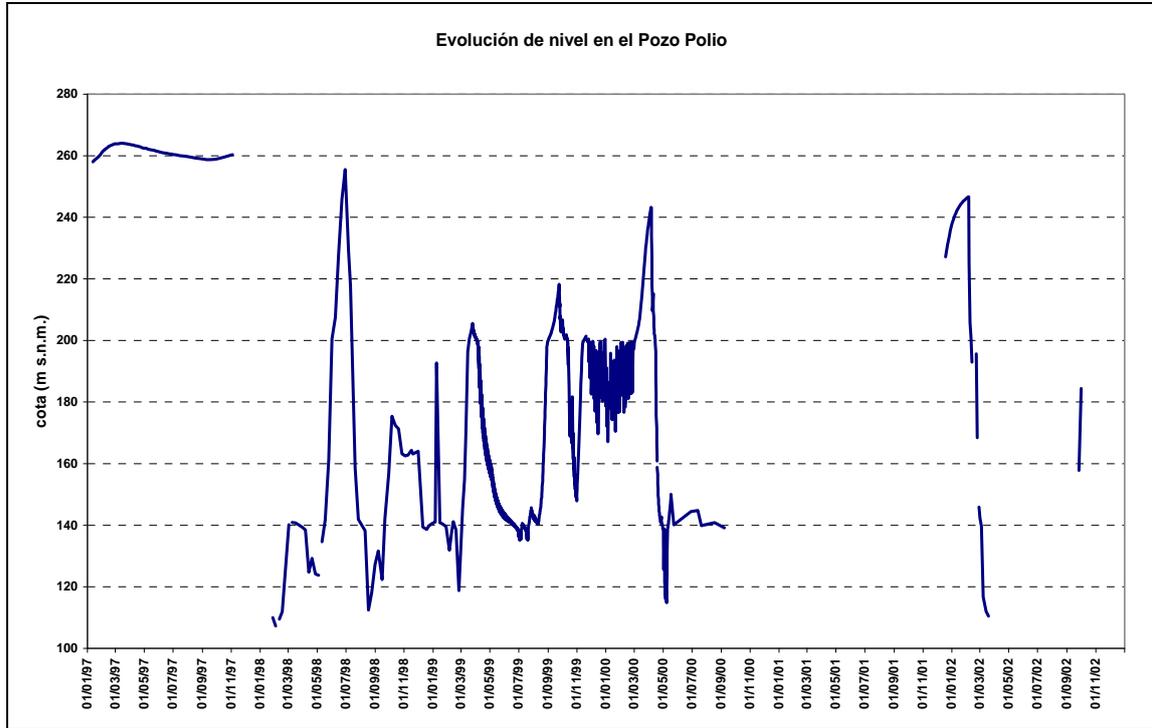


Figura 12-1.- Evolución del nivel de agua en el Pozo Polio durante el periodo de control (1997-2002)

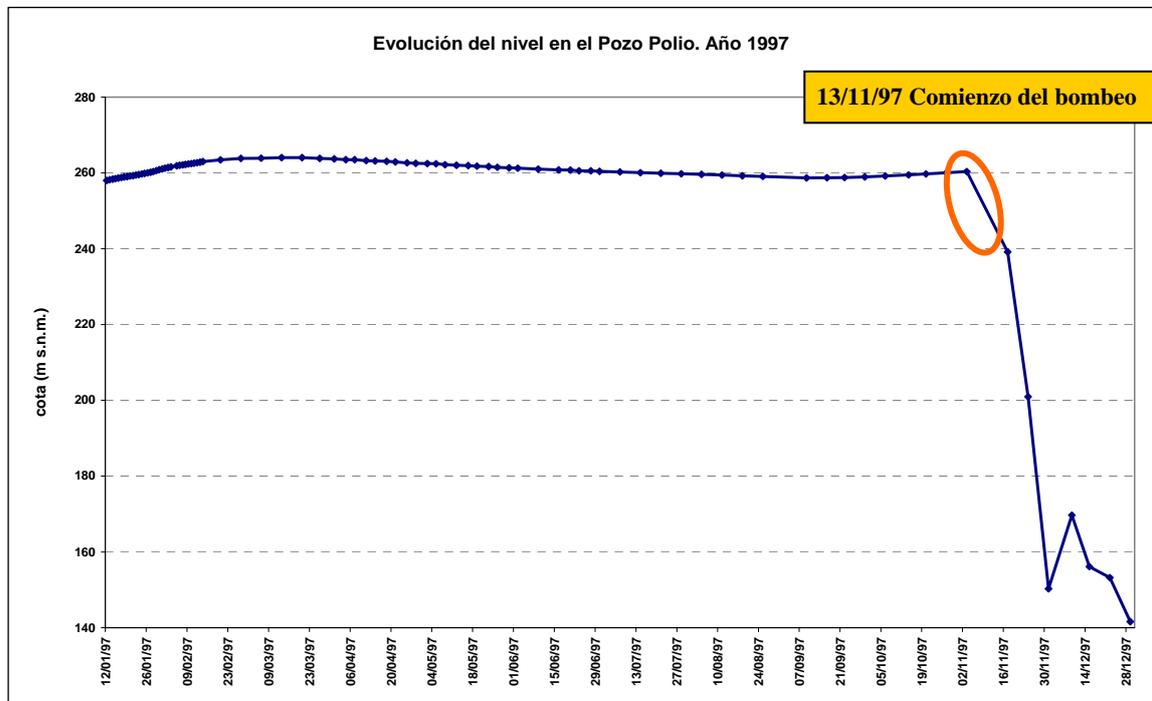


Figura 12-2.- Evolución de nivel de agua en el Pozo Polio. Año 1997

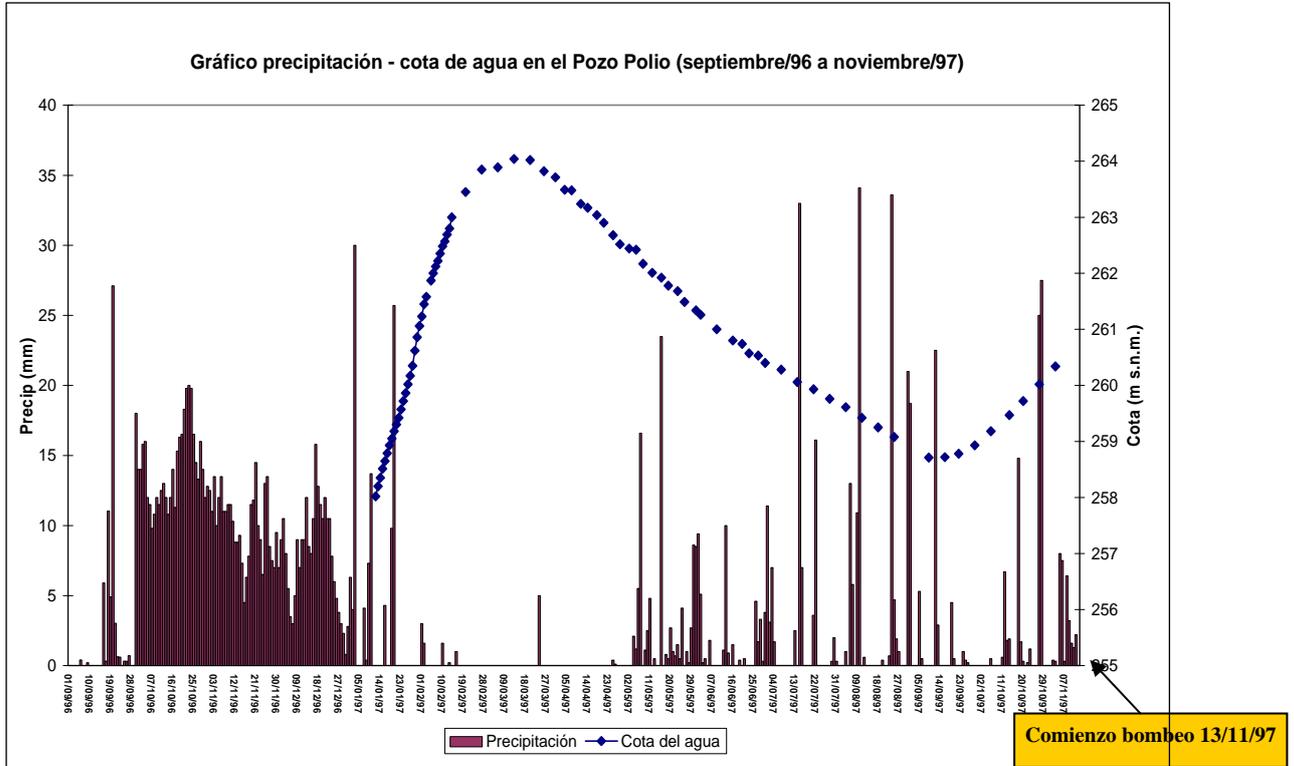


Figura 12-3.- Curva precipitación /Estación Sta. Cruz de Mieres)-Inundación del Pozo Polio. Septiembre 1996 - Noviembre 1997

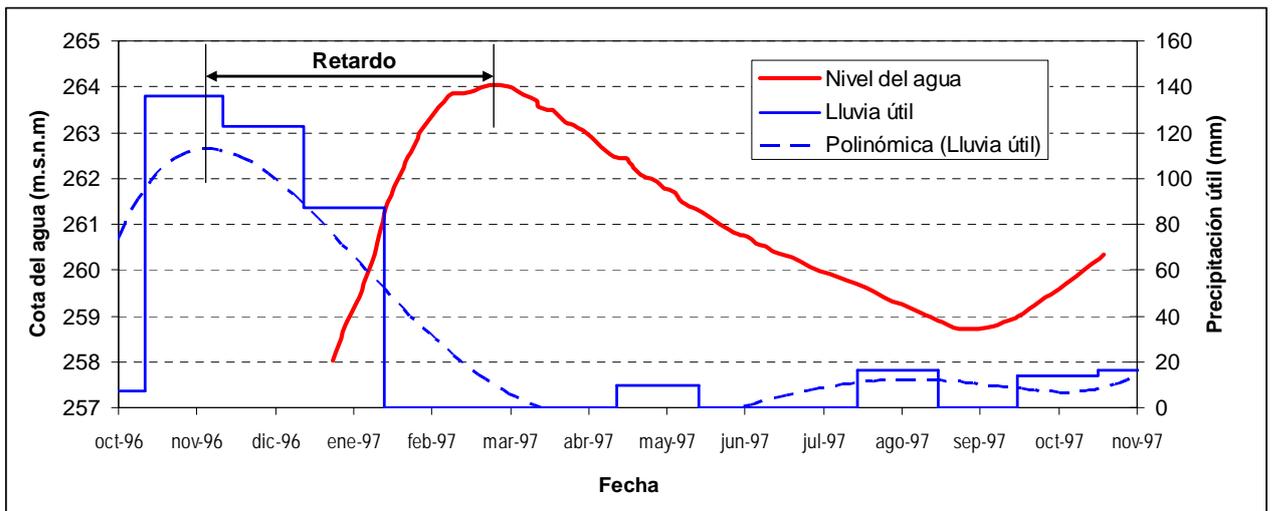


Figura 12-4.- Curva lluvia útil /Estación Sta. Cruz de Mieres)-Inundación del Pozo Polio. Octubre 1996- Octubre 1997

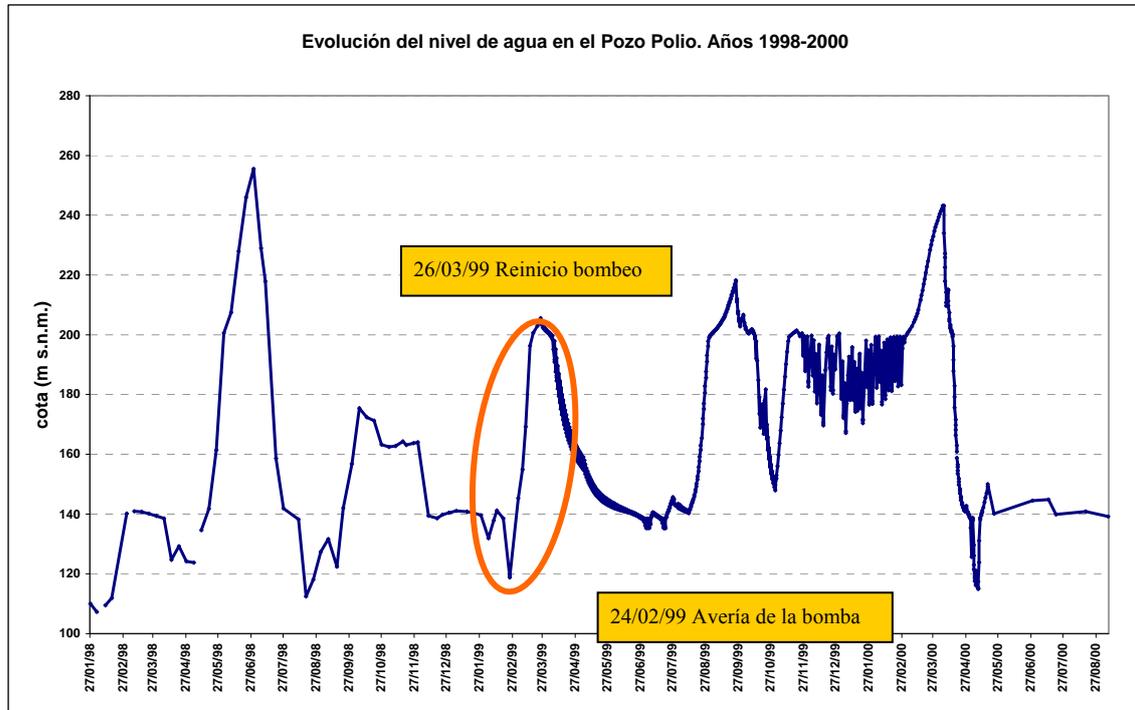


Figura 12-5.- Evolución de la cota del agua en el Pozo Polio desde enero de 1998 a agosto de 2000

A partir de 1998 las fluctuaciones de nivel observadas son debidas a variaciones en el régimen de funcionamiento del bombeo así como a cambios en el volumen de precipitación. La parada debida a una avería en febrero de 1999 y su posterior arranque en marzo del mismo año ha permitido el cálculo de una velocidad media de ascenso del agua en este periodo del orden de 3 m/día.

En los meses de octubre a diciembre de 2000, las fluctuaciones fueron debidas al sistema de arranque de las bombas instalado. Este consistió en que las bombas arrancaban cuando el agua sobrepasaba el nivel máximo y paraba al alcanzar el nivel mínimo, pero no se dispone de medidas de nivel. Durante el año 2002 se realizaron varias paradas de la bomba mediante disparos térmicos y arranques sucesivos. Las medidas de nivel no son continuas en el tiempo; entre agosto de 2000 y diciembre de 2001, y entre marzo y septiembre de 2002 no se dispone de datos de niveles, o las medidas son escasas.

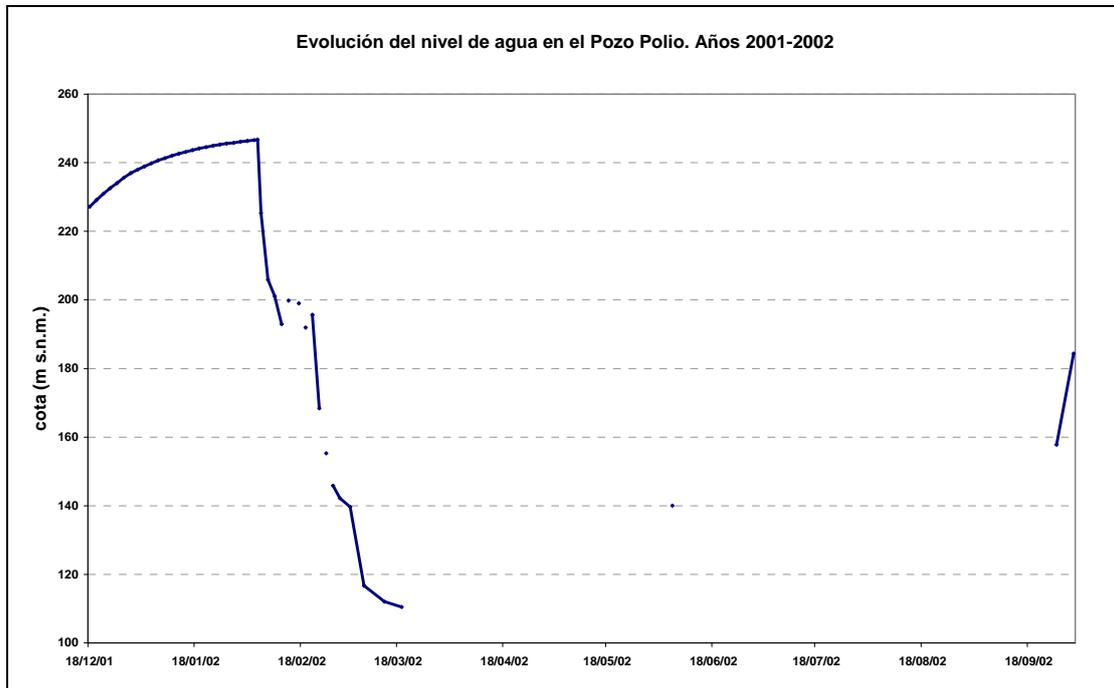


Figura 12-6.- Evolución de nivel del agua Pozo Polio: diciembre 2001 – octubre 2002

A partir del 1 de octubre de 2002 se interrumpen las labores de control de nivel y se reanudan en enero de 2007. En la Figura 12-7 se han representado los datos de nivel, precipitación y volumen de bombeo correspondientes a los años 2007 y 2008; como en años precedentes, se observa que las fluctuaciones de nivel están relacionadas con variaciones en las condiciones del régimen de bombeo y/o cambios en el volumen de precipitación.

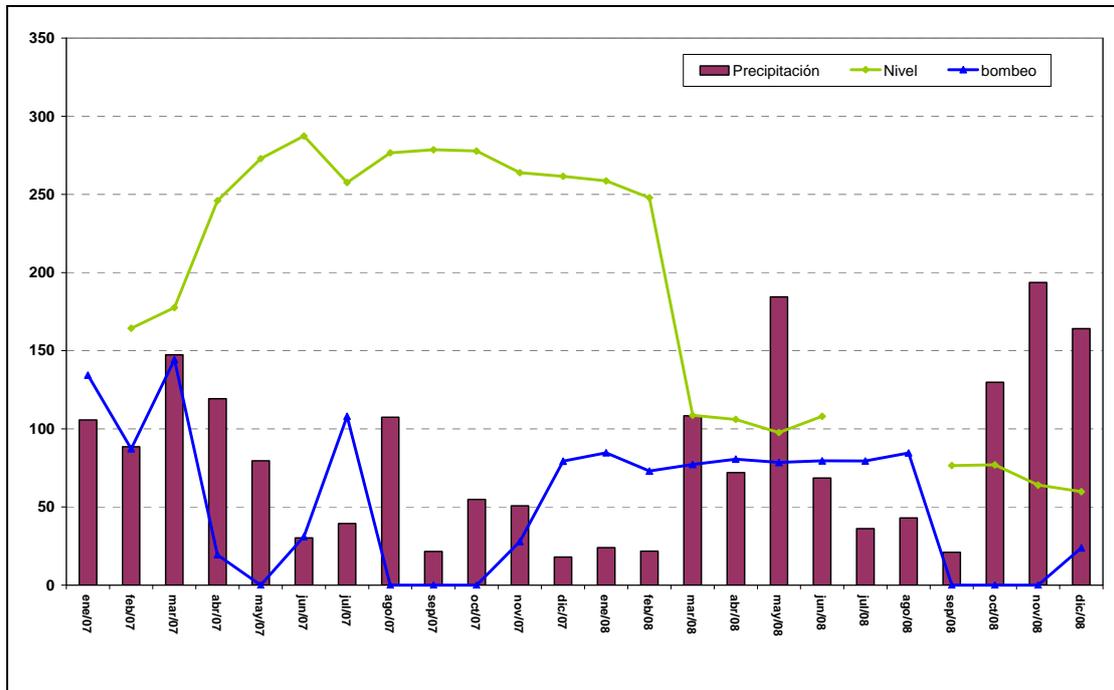


Figura 12-7.- Datos de evolución de nivel del pozo Polio 2007-2008

12.2. ESTUDIO DEL PROCESO DE INUNDACIÓN DEL POZO TRES AMIGOS

El proceso de inundación del Pozo Tres Amigos se inició en enero del 2001 al suspender el bombeo y evacuación del agua de las labores mineras de interior tras el cese de la actividad extractiva. Desde esa fecha, el nivel del agua ascendió hasta llegar a su cota natural de desagüe a través de la bocamina “El Bescón” situada a 285,0 m.s.n.m., en marzo de 2004. Coincidiendo con la llegada del agua a su nivel de rebose natural se observaron humedades y encharcamientos en algunos sótanos y viviendas de la zona que se relacionaron con la inundación de las labores mineras.

Con el fin de evitar y eliminar las humedades observadas, se reanudó el bombeo en la caña del Pozo Tres Amigos procurando mantener el nivel unos 5 m por debajo de la cota de desagüe de “El Bescón” (es decir, a unos 280,0 m s.n.m.). Sin embargo, durante algunos periodos de fuertes precipitaciones o episodios de deshielo rápido, el sistema de bombeo instalado no permite mantener el nivel del agua a dicha cota.

Desde febrero de 2008 y a petición del Grupo HUNOSA, la empresa AITEMIN empezó a realizar una serie de trabajos para mejorar el conocimiento del proceso de inundación del Pozo Tres Amigos, en relación a los problemas de humedades e inundaciones originadas en viviendas y sótanos de la localidad de Vegadotos, estudiando y analizando las posibles soluciones al problema (AITEMIN, 2009).

El control de la evolución del nivel del agua se realiza desde febrero de 2008 mediante un equipo automático de medida.

12.2.1. SEGUIMIENTO Y MONITORIZACIÓN

El Departamento de Medio Ambiente del Grupo HUNOSA realiza el seguimiento manual del nivel de agua en los pozos Polio y Tres Amigos mediante una sonda hidronivel, y además, como se mencionó anteriormente, la empresa AITEMIN instaló un equipo automático de medida

El equipo instalado en el Pozo Tres Amigos consta de un sensor de presión absoluta (tipo Druck PTX 1830, de rango 35 bar) que va conectado mediante carrete de cable subacuático a un registrador automático de datos o *datalogger* (modelo Campbell CR10X, de 6 canales) situado en superficie. El conjunto es alimentado mediante una batería de 12 V cuya autonomía es de aproximadamente 3-4 meses.

Todo el equipo fue instalado en el interior de una arqueta subterránea, de tapa metálica y cierre mediante candado, situada junto al castillete del pozo. El sensor se introdujo por la caña del pozo desde dicha arqueta y quedó instalado a 51,37 m de profundidad desde la superficie del terreno. Desde entonces, el equipo toma medidas del nivel del agua cada 10 minutos y las almacena en el registrador de datos (*datalogger*). El Grupo HUNOSA tiene la capacidad y los medios necesarios (cable de conexión a *datalogger* y programas informáticos) para realizar el volcado de datos del registrador con la frecuencia que considere oportuna (AITEMIN, 2009).

Un resumen de los niveles de agua medidos hasta la fecha se muestran en la Tabla 12-1 y gráficamente en las Figura 12-8 a Figura 12-10. Debido a la gran cantidad de datos, la gráfica ha tenido que ser separada en partes para su análisis en este informe.

Tabla 12-1.- Cota absoluta del nivel del agua, medida en la caña del Pozo Tres Amigos. Entre paréntesis figura la cota (m.s.n.m.) de la brocal del pozo

Fecha	Pozo Tres Amigos (316)
02/04/2008	286.9
10/04/2008	286.1
20/04/2008	285.5
01/05/2008	285.6
10/05/2008	285.5
20/05/2008	286.2
01/06/2008	283.9
10/06/2008	285.5
20/06/2008	283.8
01/07/2008	282.1
10/07/2008	280.3
20/07/2008	278.9
01/08/2008	278.4
10/08/2008	282.4
20/08/2008	284.1
01/09/2008	285.1
10/09/2008	285.4
20/09/2008	285.6
01/10/2008	285.6
10/10/2008	282.6
20/10/2008	277.9
01/11/2008	275.3
10/11/2008	278.1
20/11/2008	278.4
01/12/2008	285.3
10/12/2008	286.7
20/12/2008	291.8
01/01/2009	287.6
10/01/2009	284.6
20/01/2009	282.4
01/02/2009	281.3
10/02/2009	283.0
20/02/2009	285.1
01/03/2009	283.5
10/03/2009	287.9
20/03/2009	286.8
01/04/2009	283.7
10/04/2009	282.5
20/04/2009	281.9
01/05/2009	282.1
10/05/2009	281.4
20/05/2009	280.5
01/06/2009	279.2
10/06/2009	278.5
16/06/2009	286.9

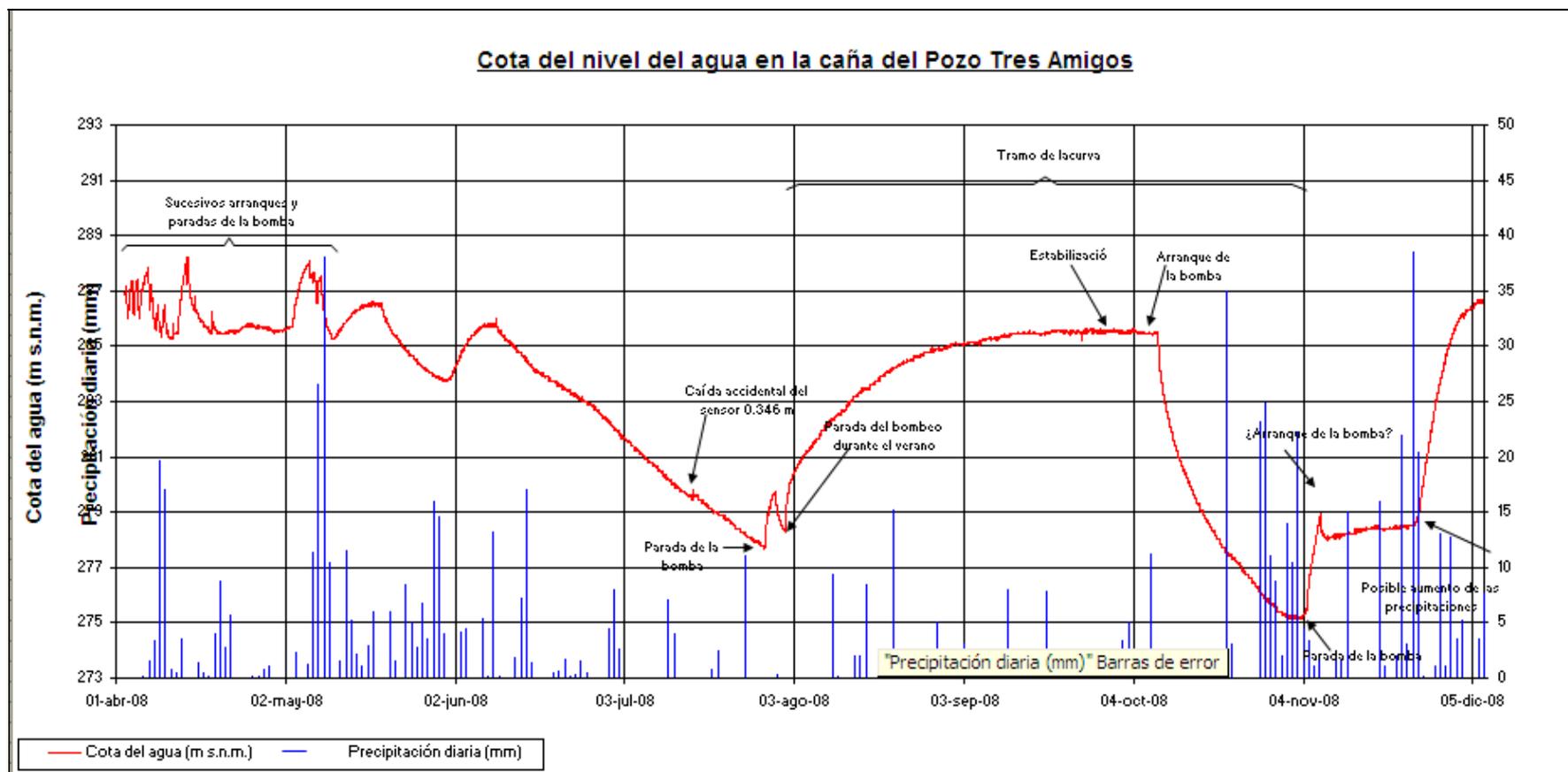


Figura 12-8.- Evolución de la cota absoluta del agua medida en la caña del Pozo Tres Amigos desde abril hasta diciembre de 2008, comparado con los datos diarios de precipitación de la estación de Santa Cruz de Mieres (modificado de AITEMIN, 2009).

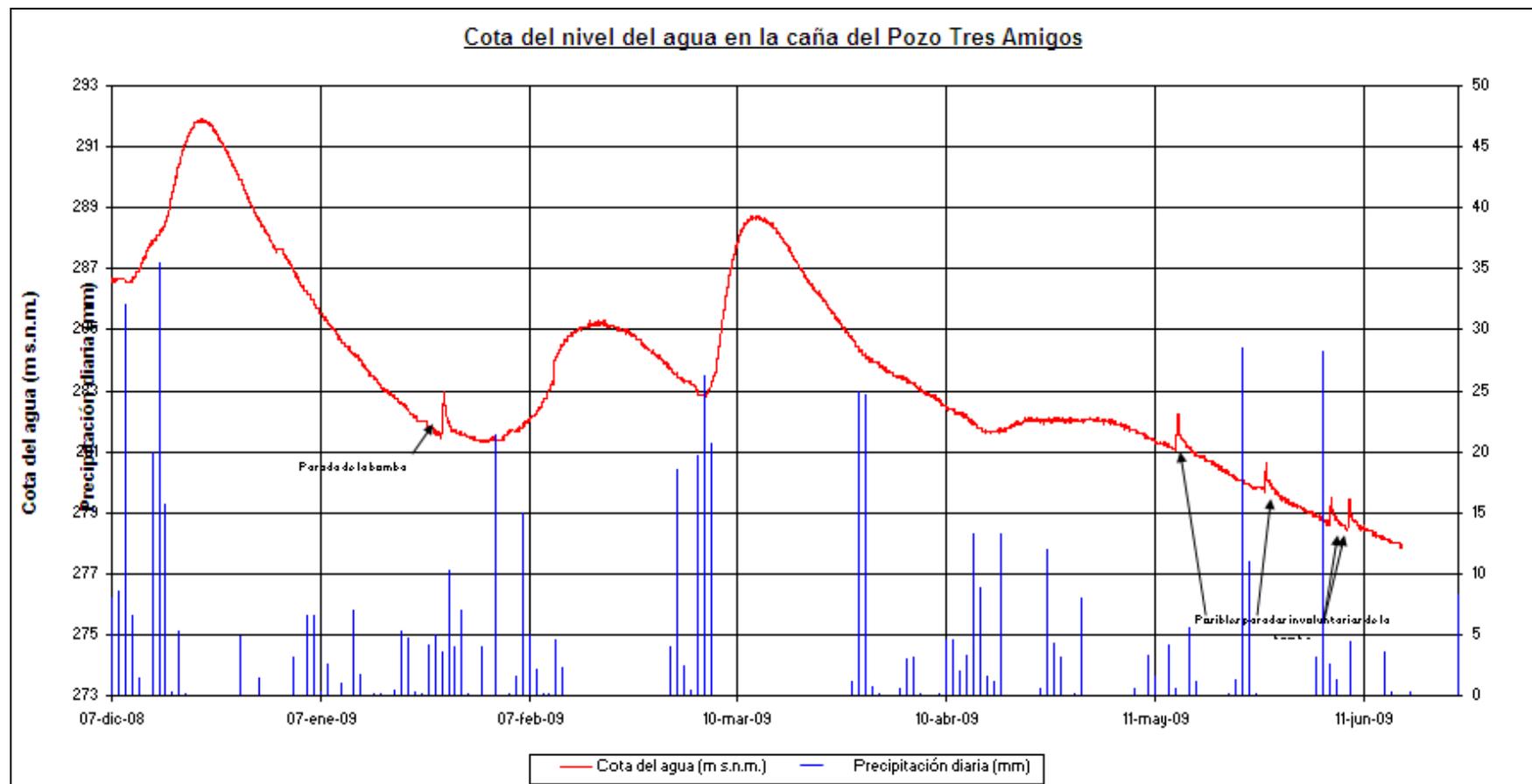


Figura 12-9.- Evolución de la cota absoluta del agua medida en la caña del Pozo Tres Amigos desde diciembre de 2008 hasta junio de 2009, comparado con los datos diarios de precipitación de la estación de Santa Cruz de Mieres (modificado de AITEMIN, 2009).

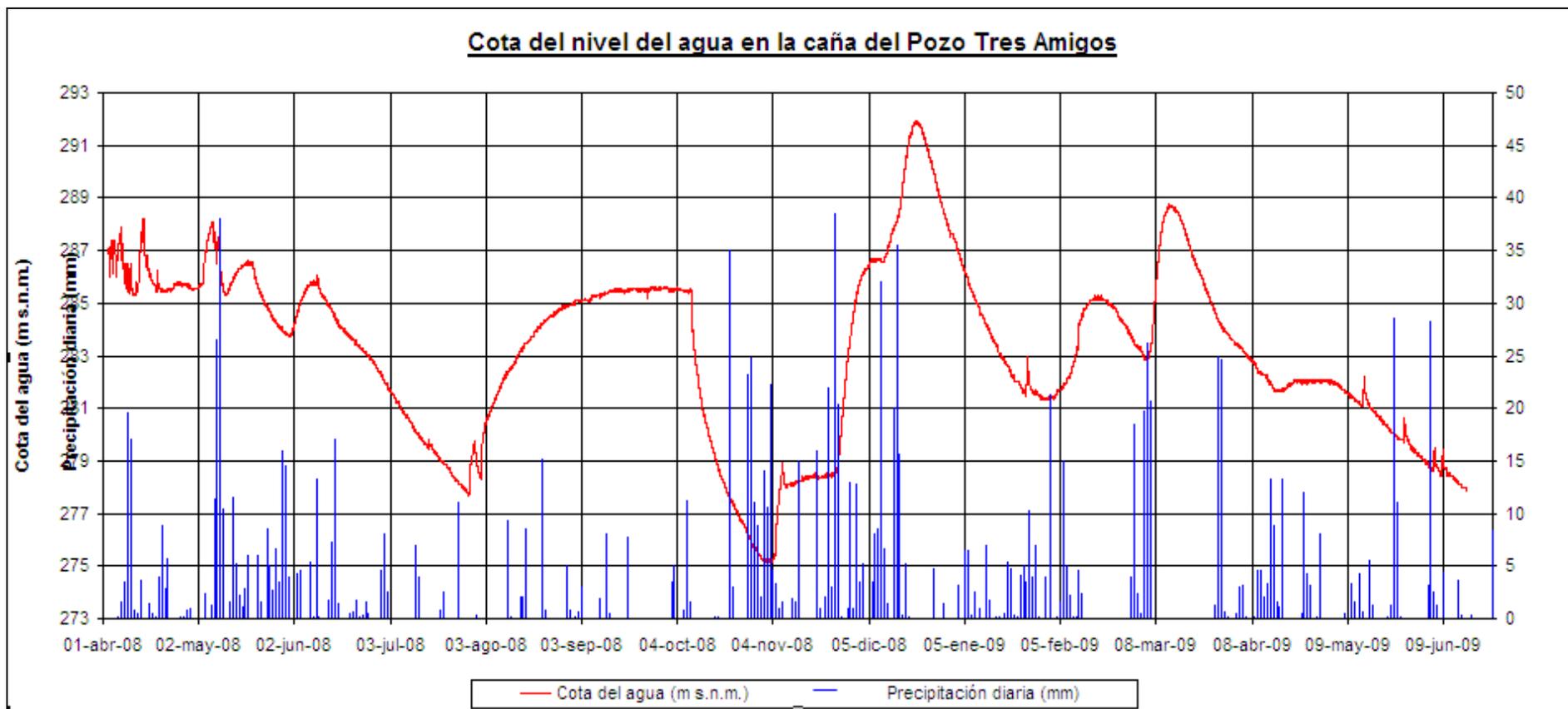


Figura 12-10.- Resumen de la evolución de la cota absoluta del agua medida en la caña del Pozo Tres Amigos (modificado de AITEMIN, 2009).

Como se puede observar en dichas figuras, las variaciones del nivel del agua en la caña del pozo reflejan claramente las precipitaciones producidas en la zona y los distintos episodios de arranque y parada de la bomba.

Durante el mes de mayo y principios de junio de 2008, las variaciones de nivel debidas al funcionamiento periódico de la bomba se muestran más suavizadas, debido posiblemente al efecto de las precipitaciones, las cuales contrarrestan en cierta medida dichos cambios de nivel. Asimismo, a partir del 9 de junio se observa un descenso continuado del nivel del agua, debido seguramente al funcionamiento constante del equipo de bombeo. También se puede observar claramente el desplazamiento del sensor que tuvo lugar a partir del 15 de julio. Dicho desplazamiento fue corregido el 1 de agosto y por tanto, no debería afectar a las siguientes medidas registradas a partir de esta fecha.

Desde el 1 de agosto hasta el 8 de octubre de 2008, el equipo de bombeo permaneció totalmente parado. El ascenso del nivel del agua en la caña del Pozo Tres Amigos fue progresivo hasta alcanzar la cota entorno a 285,4 m s.n.m., en la cual se estabilizó. A partir de esa fecha (8 de octubre de 2008) se reinició el bombeo del agua en el pozo con el fin de deprimir el nivel antes del comienzo del periodo de mayores precipitaciones. Desde esa fecha hasta el 3 de noviembre se observa un descenso progresivo del nivel del agua en la caña del pozo debido al drenaje del mismo, alcanzándose el nivel más bajo registrado hasta esa fecha (275,1 m s.n.m.). Sin embargo, a partir del 3 de noviembre el nivel asciende rápidamente hasta alcanzar los 278,9 m.s.n.m. el 7 de noviembre, lo que parece indicar una posible parada de la bomba. Ese mismo día vuelve a registrarse un rápido descenso del nivel del agua en la caña del pozo (de aproximadamente 1 m en pocas horas) lo que parece indicar un nuevo arranque de la bomba.

Entre el 7 y el 24 de noviembre se observa un ligero ascenso del nivel, de aproximadamente medio metro, aunque de forma irregular. Dicho ascenso podría deberse al efecto de la precipitación durante esos días contrarestando, en gran medida, por el bombeo. A partir del 24 de noviembre, el ascenso del nivel del agua en la caña del Pozo Tres Amigos es muy rápido y progresivo hasta alcanzar la cota de 286,0 m s.n.m. Desde principios de noviembre y hasta mediados de diciembre de 2008 el nivel del agua en la caña del pozo asciende de manera más o menos progresiva, debido al aumento de las precipitaciones, hasta alcanzar la cota más elevada registrada hasta esa fecha (291,9 m s.n.m. el día 20 de diciembre de 2008). Desde mediados de diciembre de 2008 y hasta finales de enero de 2009 el nivel del agua en la caña del pozo baja progresivamente hasta alcanzar los 281,3 m s.n.m., debido a una importante disminución de las precipitaciones.

Desde febrero hasta abril de 2009, hay dos aumentos sucesivos del nivel del agua que parece que parecen responder a las precipitaciones registradas en la zona. Desde marzo hasta finales de junio se produce un descenso del nivel causado por el descenso de las precipitaciones, acompañado de los que posiblemente fueron pequeñas paradas involuntarias de la bomba.

El periodo de medidas registrado pone de manifiesto que el equipo de bombeo instalado en el pozo no tiene capacidad para drenar los minados e impedir el aumento del nivel del agua en periodos de intensa precipitación. La mayor parte del tiempo el nivel del agua en el pozo supera la cota de la carretera que pasa al lado del pozo.

Se puede apreciar que desde principios de agosto de 2008 y hasta el 8 de octubre del mismo año (coincidiendo con un periodo de escasas precipitaciones, con una lluvia útil prácticamente nula por ser un periodo estival, y con el equipo de bombeo parado), el nivel del agua asciende progresivamente hasta estabilizarse de manera natural entorno a la cota 285,50 m s.n.m. Seguidamente, se reinicia el bombeo de agua en el pozo (con el fin de bajar el nivel lo más posible antes del comienzo del

periodo de mayores precipitaciones) y se deprime hasta alcanzar la cota 275,12 m s.n.m el 3 de noviembre de 2008 (la cota más baja observada en todo el periodo de medias). Las variaciones del nivel del agua registradas en la caña del pozo muestran una clara correlación con las precipitaciones producidas en la zona. El desfase entre las lluvias y el ascenso del nivel en la caña del pozo es tan solo de unos días, lo que pone de manifiesto la gran capacidad de la infiltración en la zona debido a la presencia de huecos relacionados con la actividad minera. Tanto el desfase como la intensidad de la respuesta a la lluvia es variable en función de la época en la que ésta tiene lugar (que se corresponderá con distinta intensidad y volumen de precipitación).

Parece que en las inmediaciones del Pozo Tres Amigos existe un comportamiento hidráulico diferente entre la ladera norte y la ladera sur del valle del río San Juan. En la ladera norte se observa que la abundante minería de montaña conectada con la superficie del terreno favorece la infiltración y la circulación rápida del agua en el interior del macizo y, por tanto, una rápida respuesta al ascenso del nivel freático en la zona. En la ladera sur, sin embargo, se observa un gradiente hidráulico mayor, condicionado seguramente por la escasa presencia de minados, los cuales se desarrollan fundamentalmente por debajo del nivel de 1ª planta del Pozo Tres Amigos (cota 252,9 m s.n.m.), donde se sitúa la mayor capacidad de almacenamiento. Por encima de esta cota los minados existentes (principalmente en la ladera norte) no presentan una capacidad de almacenamiento importante como pone de manifiesto la evolución del nivel del agua en el pozo. De mantenerse la situación actual, para evitar que se produzcan surgencias de agua en superficie, habría que deprimir el nivel del agua en la caña del pozo hasta por debajo de la 1ª planta con el fin de tener una buena capacidad de almacenamiento en los minados y poder laminar el ascenso de los niveles en periodos de fuerte precipitación (AITEMIN, 2009).

12.3. MODELO DE INUNDACIÓN

Ante la necesidad de conocer la evolución del agua, ascenso del nivel y circulación de la misma, durante el proceso natural de inundación al cesar la actividad extractiva en la minería de interior, se optó por desarrollar junto a la empresa Sadim una herramienta informática que permitiera la visualización gráfica y modelización, para diferentes épocas y supuestos de carga-descarga, de la evolución del ascenso del agua, a lo largo de los diferentes huecos mineros que el Grupo HUNOSA ha generado durante los años de actividad minera.

Debido al carácter lineal que representa toda la infraestructura minera, pozos de extracción, galerías de acceso, galerías de explotación etc..., necesaria para el normal desarrollo de la actividad, y a las especiales características geológicas e hidrogeológicas de la Cuenca Carbonífera Central (materiales prácticamente impermeables, elevados buzamientos), se optó por desarrollar una herramienta propia que recogiese las peculiaridades de nuestro sistema, ya que los programas de modelización al uso, Modflow o similares, no son aplicables de forma directa a nuestro objeto de estudio.

Dado que los diferentes servicios de topografía del Grupo HUNOSA utilizan la misma herramienta informática, Microstation, se optó por desarrollar una aplicación que en base a esta información permitiera alcanzar los objetivos deseados sin necesidad de adquirir nuevos paquetes informáticos.

La información de partida de la que se disponía era la siguiente:

- Gráfico 3D de la topología de las diferentes labores mineras en un fichero DGN de Microstation
- Información numérica de caudales de aporte y extracción

En los anexos, en el apartado I.3 correspondiente al Modelo de inundación, aparece una descripción de la solución implementada, sus funciones, instalación y ejecución.

Funcionalidades de la aplicación

La aplicación en primer lugar procede a la lectura de los diferentes elementos contenidos en el archivo dgn, agrupando por zonas según se hayan definido en los ficheros de configuración.

Para el conjunto de los pozos Polio – Tres Amigos, se diferenciaron dos zonas con distintas fases de llenado, una zona correspondiente a cada pozo, ya que funcionan independientemente.

Posteriormente calcula los volúmenes reales representados por las líneas (galerías) y superficies (capas). Finalmente cada zona es dividida en secciones de un metro de altura calculando los volúmenes reales de cada sección, con el objeto de acelerar y simplificar los cálculos de posición a fecha dada.

El programa almacena en un fichero los resultados del análisis que se cargarán automáticamente con la aplicación de forma que no sea necesario volver a analizar los elementos gráficos en cada ejecución.

Cálculo de posición y estado en una fecha determinada

Inicialmente, se calcula el volumen de agua acumulada en el hueco minero hasta la fecha indicada, así como las zonas en las que se encuentra, según los volúmenes y órdenes de llenado/vaciado definidos para los distintos caudales.

Una vez calculadas las condiciones resultantes de cada zona para un caudal

entrante fijado y una fecha determinada, se muestran los resultados de la capacidad, el volumen de agua almacenado y la cota del agua en cada zona, en la ventana de texto del interfaz, y gráficamente se visualizan sobre el dgn 3D de las diferentes labores mineras (Figura 12-11).

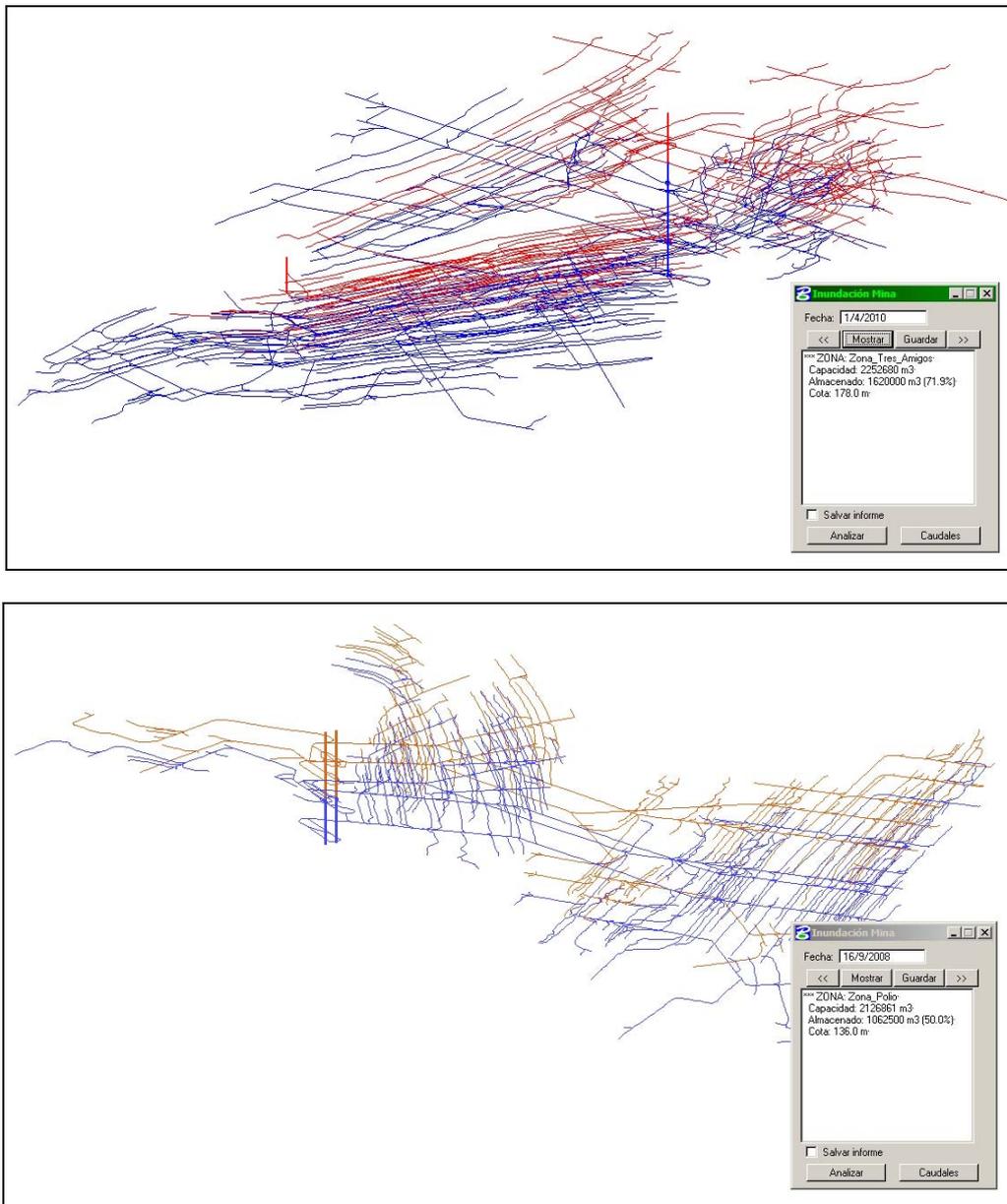


Figura 12-11.- Ejemplo de la visualización de la inundación de las labores de los pozos, donde se muestra la interfaz con los valores de volumen almacenado y cota del agua. El color azul muestra las labores ya inundadas

13. RIESGOS DE AFECCIÓN DEL PROCESO DE INUNDACIÓN

Al finalizar el proceso de inundación del Pozo Tres Amigos se observó un impacto en superficie provocado por el rebote de las agua en algunas de las viviendas del entorno del pozo. Con el objeto de mitigar dicho impacto se contrataron una serie de estudio a la empresa de ingeniería AITEMIN donde se proponen una serie de medidas para reducir dichas afecciones. Principalmente consisten en sondeos de drenaje y posible apertura de una galería minera de montaña existente en las inmediaciones. Dicho informe, de título “Trabajos de hidrogeología en relación con el Pozo Tres Amigos, Mieres, Asturias” (AITEMIN, 2009) se incluye en el anexo V.

14. POSIBILIDADES DE APROVECHAMIENTO DEL AGUA

Paralelamente al resto de los trabajos, se ha llevado a cabo un estudio de las posibilidades de aprovechamiento de las aguas mineras de la zona, así como un análisis de la demanda. El análisis de los puntos de captación ha incluido los dos factores fundamentales para un posible aprovechamiento: por un lado, la cantidad de agua disponible, para lo que se estudiaron en detalle las infraestructuras hidráulicas de las que el Grupo HUNOSA dispone, y, por otro, la calidad de las aguas bombeadas, de cara a la determinación de los sistemas de depuración necesarios para los distintos posibles usos de las mismas.

Este estudio se realizó basándose fundamentalmente en una campaña de campo, constatando el estado de los sistemas de bombeo (parámetros reales y nominales de las bombas, especialmente altura manométrica, potencia de los motores y caudal evacuado, materiales de las tuberías, incrustaciones, etc.), los caudales realmente desaguados, y realizando una primera estimación de la calidad de las aguas, mediante medidas de la temperatura, conductividad, pH y contenido en sólidos en suspensión del agua de los pozos, procurando evaluar el origen de los posibles contaminantes.

Como parte del trabajo realizado se contactó con el Ayuntamiento de Mieres, así como con la mayoría de las empresas sitas en las cercanías de los puntos de vertido.

Una vez realizadas las visitas, y analizados los datos aportados por los pozos, se concluyó que la posibilidad de abastecimiento más viable sería el aprovechamiento de las aguas de vertido del Pozo Polio mediante suministro al Depósito de Rioturbio y se procedió al análisis completo de las muestras conforme al Real Decreto 140/2003.

Una vez estudiada la calidad de las aguas aprovechables se realizó un análisis somero de las necesidades de tratamiento del agua captada de acuerdo a las necesidades concretas del posible usuario, así como un estudio de las infraestructuras de transporte del agua al potencial destinatario. Las aguas estudiadas, de acuerdo a los resultados de los análisis realizados, podrían utilizarse tras un tratamiento tipo A2. Dicho tratamiento consistirá en un tratamiento físico normal, tratamiento químico normal y desinfección. Para lo cual se podría adoptar la siguiente línea de proceso:

- Preoxidación.
- Filtración.
- Desinfección.

Asimismo, el intenso estudio llevado a cabo en la zona ha permitido constatar la viabilidad del aprovechamiento térmico de las aguas, de cara a la utilización de la energía geotérmica que estas transportan para calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria. En el caso de la zona objeto de estudio, se considerará para los cálculos que siguen el caudal desaguado por los pozos Polio y Tres Amigos (aproximadamente 1,87 Hm³ /año, tomando como media el desagüe de los cinco últimos años) ya que mantienen una temperatura estable que oscila entre los 15 y 20°C, y se mantiene constante a lo largo de todo el año. Estas condiciones de caudal y temperatura son muy favorables para su utilización como fuente de energía mediante sistemas de bomba de calor, que permiten el empleo de fuentes de energía térmica de baja entalpía.

Un cálculo aproximado del potencial térmico de los pozos sitios en la zona objeto de estudio podría obtenerse aplicando la fórmula:

$$P_t = (\Delta T \times Q \times C_e \times \rho) / t$$

- Donde:
- ΔT = Salto térmico aprovechable ($^{\circ}\text{C}$), que en un caso conservador se podría aproximar a 5°C .
- Q = Volumen evacuado anualmente (m^3), que en este caso sería de hasta $1,87 \text{ Hm}^3$.
- C_e = Calor específico del agua ($\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$).
- ρ = Densidad del agua (kg/m^3).
- t = Tiempo de funcionamiento (s).

$$P_t = 5^{\circ}\text{C} \times 1,87 \times 10^6 \text{m}^3 \times 4.186 \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1} \times 1000 \text{kg}\cdot\text{m}^{-3} \times 1 / (365 \times 24 \times 3600) \text{s}^{-1} \approx 1,24 \text{ MW}_t$$

Esta cifra supone un potencial energético que actualmente se está desaprovechando, y al que, por puro concepto de sostenibilidad, se busca dar uso. Si se tienen en cuenta los coeficientes de eficiencia que en climas suaves alcanzan las bombas de calor comerciales, se puede calcular la energía necesaria para el funcionamiento del compresor, que representa el consumo energético del sistema. Las bombas de calor agua-agua habituales ofrecen valores de $\text{COP} \geq 5$, pudiendo producir agua caliente a 45°C (CIATESA, 2007).

El potencial térmico del foco caliente será $P_c = P_f + W_e$, siendo W_e el trabajo aportado al compresor de la bomba de calor. Por tanto:

$$\text{COP} = P_c / W_e = (P_f + W_e) / W_e = 1 + P_f / W_e > 5 \Rightarrow W_e < P_f / 4$$

$$W_e \approx 0,31 \text{ MW}_{\text{eléctricos}}$$

A partir de estos datos, considerando el rendimiento de las bombas de calor habituales, se tiene que un consumo de $0,31 \text{ MW}_{\text{eléctricos}}$ generaría una potencia térmica de calefacción de $1,24 + 0,31 = 1,55 \text{ MW}_t$.

Puesto que, como se ha dicho, la bomba estaría disponible durante 24 horas diarias, esto supondría una energía térmica anual disponible para calefacción de $1,55 \cdot 24 \cdot 365 = 13.578 \text{ MWh}_t$ /año, consumiendo únicamente $0,31 \cdot 24 \cdot 365 = 2.716 \text{ MWh}_{\text{eléctricos}}$ /año.

El uso de esta fuente de calor disminuye de forma importante las emisiones de CO_2 respecto a los sistemas tradicionales, permitiendo reducciones medias que oscilan entre un 65% y un 54%, en el caso de usar gasóleo o gas natural respectivamente, en lugar de la bomba de calor.

Finalmente, es determinante el balance económico. Teniendo en cuenta que el coste del kWh_t facilitado por la bomba de calor es el precio del kWh_t/COP , y partiendo del precio medio en España en 2006, para consumidores industriales como el Grupo HUNOSA (EUROSTAT, 2007), de $0,0757 \text{ €/kWh}_e$, sin IVA, se tendría un coste de $0,0150 \text{ €/kWh}_t$.

Para su comparación con el kWh_t producido con caldera de gas (el sistema más habitual en esta zona) se parte de unos precios recogidos en el BOE de Sábado 30 de Diciembre de 2006, con aplicación de la tarifa 3.2, para consumidores con consumos superiores a 5.000 kWh/año e inferiores a 50.000 kWh/año , que consta de un término fijo de $5,4600 \text{ €/mes}$ y un término variable de $0,0421 \text{ €/kWh}$. Considerando un rendimiento de la caldera de gas del 90%, el coste final sería de $0,0467 \text{ €/kWh}_t$.

Cabe señalar, además, que, aún imputando los costes de los desagües, este suministro térmico puede ser muy competitivo frente a los sistemas convencionales de suministro de calefacción y agua caliente sanitaria, suponiendo, por otra parte, la generación de nuevos puestos de trabajo. Esta competitividad evolucionará muy positivamente ante la previsible evolución de los costes del gasóleo de calefacción y del gas natural.

Por todo esto, se considera que la utilización de la energía geotérmica de las aguas de mina vendría a mejorar la economía y sostenibilidad medioambiental de los edificios en los que el sistema se implementase, permitiendo un claro ahorro energético, así como una disminución de la cantidad de CO₂ total emitida a la atmósfera como consecuencia de la climatización de los espacios.

Paralelamente a estos estudios se ha llevado a cabo un análisis de aprovechamiento potencial de los recursos hídricos como fuente de energía hidroeléctrica. Dicho aprovechamiento se realizaría mediante la construcción de diques en las bocaminas afectadas que permitirían almacenar los caudales necesarios para el funcionamiento adecuado de microturbinas hidráulicas.

Sin embargo, en la zona objeto de estudio, ninguna de las bocaminas inventariadas es susceptible de uso, fundamentalmente debido a los bajos caudales de vertido (únicamente el caudal de la bocamina Baltasara alcanza 15 L/s). En el caso de aprovechamiento de esta última bocamina, su proximidad a otros puntos de vertido hace prever que el potencial de almacenamiento de agua no sea suficiente como para permitir operar microturbinas comerciales, por lo que se ha descartado un estudio de detalle.

15. CONSIDERACIONES FINALES

La actividad minera en la Cuenca Carbonífera Central de Asturias cuenta con más de 200 años de antigüedad, en primer lugar mediante la explotación de capas de carbón en laderas como minería de montaña, continuando en los valles como minería de pozo o de fondo de valle (actualmente activa en algunas zonas) y, finalmente, como minería a cielo abierto. Estas labores han ido modificando progresivamente el medio natural, generando un importante hueco minero con capacidad para almacenamiento de agua.

Durante la actividad minera es imprescindible el bombeo de las explotaciones mediante grandes y modernas instalaciones hidráulicas, que llegan a alcanzar los 5 MWt de potencia instalada, que acaban desaguando a través de las cañas de los pozos a los cauces de ríos de la zona. Cuando cesa la actividad minera se plantea el abandono de dicho bombeo, lo que conlleva un doble reto: de un lado, es importante conocer la velocidad de ascenso del nivel del agua en el interior de las explotaciones mineras, así como el momento y el punto de desagüe del sistema, y, de otro, es fundamental garantizar que no se producirá una afección negativa en el entorno. En este segundo reto es en el que se centra el presente informe, realizado para la consecución de dos objetivos principalmente:

- La elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual y de un modelo hidrodinámico de flujo que permitan determinar las características del proceso de inundación y su impacto sobre el medio ambiente, así como la realización de un estudio hidroquímico que permita conocer la calidad de este agua y la distribución espacio-temporal de su composición.
- El análisis de la posibilidad de integrar el agua almacenada en el hueco minero en la gestión global de los recursos hídricos y su posible puesta en valor mediante otros aprovechamientos, como podría ser el energético como fuente de energía de

baja entalpía mediante el empleo de sistemas de bomba de calor o el aprovechamiento hidroeléctrico.

Este estudio ha comenzado con un intenso trabajo de recopilación y organización de la documentación geológica, minera, hidrogeológica, hidrológica, climática y sísmica, y ha abarcado el ciclo completo del agua, a saber: estudio climático, balance hídrico, inventario de puntos de agua, red de calidad, cálculo de volumen de huecos, mapa de cartografía hidrogeológica, recopilación e interpretación de informes geotécnicos, etc. Todo ha sido integrado en un Sistema de Información Geográfica como gran base de datos que ha sido utilizada como herramienta de trabajo y ha servido para definir el modelo geológico e hidrogeológico.

Paralelamente, se ha construido una cartografía geológica en 3D de la Cuenca Central Asturiana, donde se ha integrado toda la información de paquetes mineros y de labores mineras. Se han realizado, además, múltiples muestreos y análisis químicos y bacteriológicos para estudiar el potencial aprovechamiento del agua para abastecimiento a la población, conforme al RD 140/2003, así como otros análisis de caracterización para prevenir el impacto ambiental.

Con todo, se ha alcanzado un completo conocimiento del ciclo integral del agua, desde la precipitación, la escorrentía superficial, la infiltración, la circulación a través de los huecos mineros y finalmente el bombeo, vertido e impacto sobre el medio hídrico, así como la afección a zonas potencialmente inundables. Integrandos toda la información se ha elaborado un balance hídrico que permite estimar la recarga de agua que se produce en el conjunto de pozos del Grupo HUNOSA.

Dado que las explotaciones del Grupo HUNOSA se han ido concentrando en grandes unidades de producción, idénticamente ha sucedido con las estaciones de bombeo, de manera que desde un número reducido de puntos se puede suministrar cantidades de agua superiores a 1 millón de metros cúbicos, lo que permitirá alcanzar

economías de escala. Se ha constatado que dichas aguas, en algunas ocasiones, son de buena calidad, y en otras requieren sencillos tratamientos para ser aptas para consumo humano. Por tanto, el Grupo HUNOSA está en condiciones de participar en la gestión global de los recursos hídricos en la Cuenca Central Asturiana, con el firme objetivo de llegar tan lejos en la cadena de mercado como le sea posible en condiciones óptimas de coste y salubridad en caso de que las autoridades públicas (en especial el Organismo de Cuenca) resuelvan favorablemente sobre la conveniencia de que las mismas se puedan incorporar a usos públicos.

En definitiva, se puede concluir que las explotaciones mineras del Grupo HUNOSA en la zona de objeto de estudio han creado un hueco o embalse subterráneo de aproximadamente 3,9 hectómetros cúbicos, en el cual se infiltran anualmente una media de 1,9 hectómetros cúbicos de agua, aproximadamente, que son bombeados al exterior mediante grandes instalaciones hidráulicas. La red de calidad establecida controlará periódicamente los parámetros fundamentales en los puntos de agua representativos elegidos.

Este hueco minero también podría servir como herramienta de regulación de cada cuenca hidrológica. Al igual que se hace en otras cuencas del mundo, este acuífero podrá funcionar como almacén en épocas de crecida y aportar caudal durante el estiaje. Esta regulación permitiría aumentar el nivel de suministro por encima de los 1,9 hectómetros cúbicos que anualmente se han vertido a los ríos de la zona objeto de estudio.

Por último, se destaca el enorme potencial de aprovechamiento geotérmico de las aguas del Grupo HUNOSA, donde se ha constatado una gran estabilidad de temperaturas superiores a 15°C, nivel térmico óptimo para su puesta en valor con tecnologías de Bomba de Calor. El potencial térmico total de las aguas del conjunto de los pozos Polio y Tres Amigos se ha estimado en 1,55 MWt, sin considerar tecnologías de reinyección del agua en las mismas.

BIBLIOGRAFÍA

AITEMIN (2009). Trabajos de hidrogeología en relación con el pozo Tres Amigos (Mieres, Asturias)

Aller, J. A. (1986). La estructura del sector meridional de las unidades del Aramo y Cuenca Carbonífera Central. Tesis doctoral. Servicio de Publicaciones del Principado de Asturias, Oviedo, 180 pp.

Aller, J. y Brime, C. (1983). Deformación y metamorfismo en la parte sur de la Cuenca Carbonífera Central (NO. de España). Dixième Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère, volumen 3, 541-548. Madrid.

Bastida, F. y Aller, J. (1995). Rasgos Geológicos Generales. En: Geología de Asturias (Aramburu, C., Bastida, F., Eds). Editorial Trea, Gijón, 27-33.

Brookins, D.G. (1988). Eh-pH Diagrams for Geochemistry. Springer-Verlag, Berlin.

Caride, C. y García-Loygorri, A. (1968). Estratigrafía del Carbonífero productivo de Riosa (Asturias). III Jorn. Nac. I. Int. Min. Met., Gijón 1967, 1, 865-925.

Caride, C., Gerilla, M. Ortuño, G y Velando, F. (1973). Mapa geológico de España. Hoja núm 53 (Mieres). E.N.A.D.I.M.S.A. Madrid.

Casillas Castañón, F. (1984). Estudio estratigráfico de la serie Westfaliense del Valle del Río Negro (Aller).

Catalán Lafuente, J. (1981). Química del agua. Talleres Gráficos Alonso, S.A.

Capel Molina, J.J. (1981). Los climas de España. Ed. Oikos-Tau, Barcelona, 403 pp.

CIATESA. (2007). Catálogo Técnico Equipos LW. <http://www.ciatesa.es>

Colmenero Navarro, J.R., Barba Regidor, P. (1985). Un tipo de ciclo deltaico en el Westfaliense Superior de la Cuenca Carbonífera Central. Trabajos de Geología. Universidad de Oviedo, 15, 29-36.

Custodio, E. & Llamas, M.R. (1976). Hidrología subterránea. Ediciones Omega, S.A. Barcelona.

Dirección General del Agua. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2005). "Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitarias".

DGOH-ITGE, (1990). Unidades Hidrogeológicas de la España peninsular e Islas Baleares. MOPU.

Empresa Nacional Adaro De Investigaciones Mineras, S. A. (1971). Características Geológicas de la Cuenca Central Asturiana.

Empresa Nacional Adaro De Investigaciones Mineras, S. A. (1972). Investigación de Geología Aplicada en la Cuenca Hullera Central Asturiana. Estudio del sector de Turón. Memoria y Mapa.

Empresa Nacional Adaro De Investigaciones Mineras, S. A. (1972).

Investigación de Geología Aplicada en la Cuenca Hullera Central Asturiana. Estudio del sector del Aller. Memoria y Mapa.

Empresa Nacional Adaro De Investigaciones Mineras, S. A. (1973). Investigación de Geología Aplicada en la Cuenca Hullera Central Asturiana. Estudio de la zona del Caudal. Memoria y Mapa.

EUROSTAT European Commission. (2007). Energy Prices 2007. http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page?_pageid=0,1136239,0_45571447&_dad=portal&_schema=PORTAL

Fandos Rodríguez, P., Rodríguez Mateos, F. Gutiérrez Rodríguez, A. M. y Álvarez Fernández, J. J. (2004). El Yacimiento de Hunosa en la Cuenca Carbonífera Central. Servicios de Geología del caudal y del Nalón.

Felicísimo Pérez, A.M. (1992). El clima de Asturias. En: Geografía de Asturias, Editorial Prensa Asturiana, S.A., Oviedo, Vol. I, p. 17-32.

Fernández, L. P. (1995). El Carbonífero. En: Geología de Asturias (Aramburu, C., Bastida, F., Eds). Editorial Trea, Gijón, 63-80.

Fernández Álvarez, J. P. (2003). Primer inventario básico de puntos de agua del concejo de Mieres.

Fernández Gutiérrez, M^a. F. (2004). Estudio histórico sobre el patrimonio industrial del Valle del Turón. Consejería de Cultura del Principado de Asturias.

Galán, E., editor (2003). Mineralogía Aplicada. Editorial Síntesis. Madrid. 432p. ISBN: 84-9756-114-7. Patrocinado por la Universidad Internacional de

Andalucía y la Sociedad Española de Mineralogía.

García-Loygorri, A., Ortuño, G., Gervilla, M., Greber, Ch. y Feys, R. (1971). El Carbonífero de la Cuenca Central asturiana. Trabajos de geología. Univ. De Oviedo, 3. 101-150.

García-Loygorri, (1974). Caractères généraux du Bassin Central des Asturies (Espagne). Extracto de la publicación del VII Congreso Internacional de Estratigrafía del Carbonífero Krefeld (1971), 3, 111-127.

González González, A. y Sáenz de Santa María Bénédict, J.A. (1999). La problemática del agua en la minería subterránea activa y en proceso de cierre de HUNOSA.

Gutierrez Peinador, V. (1999). “Consequences of mines closure in water circulation”.

Hem, J. (1970). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural waters. US Geological Survey, paper 1473.

Higuera, P. y Oyarzun, R. año. Curso de Mineralogía y Geoquímica Ambiental. http://www.uclm.es/users/higuera/MGA/Tema00_Intro.htm.

HUNOSA (1997). Problemática de desagüe de máximas avenidas por el alcantarillón y proceso de inundación del Pozo Polio. Posibles soluciones. Dep. Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo.

IGME (Instituto Geológico y Minero de España), (1984). Investigación Hidrogeológica de la Cuenca Norte: Asturias. Plan Nacional de Investigación de

Aguas Subterráneas. Ministerio de Industria y Energía; Secretaría de la Energía y Recursos Minerales. Madrid.

INDUROT (Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio), (2003). Mapa de Zonas de Riesgo de Inundación 1:10.000.

ITGE (Instituto Tecnológico y Minero de España), (1995). Estudio de la repercusión del abandono de los pozos Entrego y San Mamés sobre la variación del nivel freático del entorno. Centro documental del IGME. Madrid.

ITK Ingeniería S.A., (2009). Informe geotécnico concentración de Batán.

Jongmans, W.I. y Wagner, R.H. (1957): Apuntes para el estudio geológico de la zona hullera de Riosa (Cuenca Central de Asturias. Est. Geol., 33-36, 7-26.

Julivert, M., (1967): La ventana del río Monasterio y la terminación meridional del Manto del Ponga. Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo, 1: 59-67.

Leyva, F., y Sáenz de Santa María, J.A., (1983). Las pudingas del carbonífero de la Cuenca Central Asturiana. Características sedimentológicas y mecanismo de sedimentación. Dixième Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère, volumen 3, 223-230. Madrid.

López-Chicano, M.; Cerón, J.C.; Vallejos, A. y Pulido-Bosch, A. (2001). Geochemistry of thermal springs, Alhama de Granada (southern Spain). Applied Geochemistry; 16, 1153-1163.

López Geta, J. A., Juan María Fornés Azcoiti y Fermín Villaroya Gil,

(2001). Las aguas Subterráneas. Un recurso natural del subsuelo. Instituto Geológico y Minero de España y Fundación Marcelino Botín. 94 pp

Lotze, F. (1945): Zur Gliderung der Varisziden der Ibererischen Meseta. Geotekt. Forsch., 6, 78-92.

Luque, C., Gervilla, M., Sáenz de Santa María, J.A., Leyva, F., Laveine, J.P., Loboziak, S., Martínez-Chacón, M.L. (1983). Características sedimentológicas y paleontológicas de los paquetes productivos en el corte de La Inverniza-El Cabo (Cuenca Central Asturiana). Dixième Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère, volumen 1, 281-302. Madrid.

Lloyd, J.W. & Heathcote, J.A. (1985). Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater. Clarendon Press. Oxford.

Marcos, A. y Pulgar, J. A. (1982). An Approach to the tectonostratigraphic evolution of the Cantabrian Foreland thrust end Fol. Belt, Hercynian Cordillera of NW Spain. N. Jb. Paläont. Abh., 163,2:256-315.

Marquínez, J., Lastra, J., García, P. (2003). Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis. Journal of Hydrology, Vol. 270, p. 1-11.

Marquínez García, J., Menéndez Duarte, S., Lastra Fernández, J., Fernández Iglesias, E., Jiménez-Alfaro González, B., Wozniak, E., Fernández Menéndez, S., García Rocas, J., García Manteca, P., Álvarez García, M. A., Lobo del Corro, T. y Adrados González, L. (2003). Riesgos Naturales en Asturias. Principado de Asturias. INDUROT. Universidad de Oviedo. KRK Ediciones. 133 pp. ISBN: 84-96119-25-4.

Martínez Alfaro, P. E., Martínez Santos, P., Castaño Castaño, S., (2006).
Fundamentos de Hidrogeología. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.

Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU), (1988). Documentación
básica Plan Hidrológico II; Confederación Hidrográfica del norte. Dirección General
de Obras Hidráulicas.

Parkhurst, D.L., Thorstenson, D.C., y Plummer, L.N., (1980). PHREEQE--A
computer program for geochemical calculations: U.S. Geological Survey Water-
Resources Investigations Report 80-96, p. 195. (Revised and reprinted August, 1990).

Piedad-Sánchez, N., Suárez-Ruiz, I., Martínez, L., Alain Izart, L.M., Elie, M.,
Keravis, D., (2004a). Organic petrology and geochemistry of the Carboniferous coal
seams from the Central Asturian Coal Basin (NW Spain). *International Journal of
Coal Geology*, 57. 211-242.

Piedad-Sánchez, N., Alain Izart, L.M., Suárez-Ruiz, I., Elie, M., Menetrier, C.,
(2004b). Paleothermicity in the Central Asturian Coal Basin, North Spain.
International Journal of Coal Geology, 58. 205-229.

Ramsay, J.G. (1967). *Folding and Fracturing of Rocks*, McGraw-Hill, New
York. 568 pp.

Rose, A. W., Hawkes, H. E. y Webb, J. S. (1979). *Geochemistry in Mineral
Exploration*, segunda ed. Academic Press, 657 pp.

Sáenz de Santa María, J.A., Luque, C., Gervilla, M., Laveine, J.P., Loboziak,
S., Brousmiche, C., Coquel, R., Martínez-Díaz, C. (1983). Aportación al
conocimiento estratigráfico y sedimentológico del carbonífero productivo de la
Cuenca Central Asturiana. *Dixième Congrès International de Stratigraphie et de*

Géologie du Carbonifère, volumen 1, 303-326. Madrid.

Sánchez de la Torre, L., Agueda Villar, J.A., Colmenero Navaro, J.R., González Lastra, J.A., Martín Llana, J. (1981). Emplazamiento de deltas progradantes y facies asociadas en el Westfaliense del borde oriental de la Cuenca Carbonífera Central (Asturias). Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo, 11, 191-201.

Sanchis, J.M. (2007). Adaro: Un Siglo de Luces. Ed Malacate

UNESCO. (1970). Leyenda internacional para mapas hidrogeológicos. Decenio Hidrológico Internacional. París. 101 p.

Wagner, R.H. (1971). The Westphalian D floras of the Olloniego and Esperanza formations in the Central Asturias Coalfield. Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo, 3, 1-39.

Younger, P. L., Hedin, R. S., y Banwart, S. A. (2002). Mine Water, Hydrology, Pollution, Remediation (Environmental Pollution).