
Aprovechamiento de las aguas subterráneas como recurso hídrico y energético

**Almudena Ordoñez Alonso
y col.**

Ayudas a la investigación 2008

FUNDACIÓN MAPFRE

Autores

Almudena Ordóñez Alonso

Doctor Ingeniero de Minas (1999) por la Universidad de Oviedo

Clara Andrés Arias

Ingeniero de Minas por la Universidad de Oviedo (2009)

Santiago Jardón Palacio

Ingeniero de Minas por la Universidad de Oviedo (1970)

Rodrigo Álvarez García

Doctor Ingeniero de Minas por la Universidad de Oviedo (2002)

Fernando Pendás Fernández

Doctor Ingeniero de Minas por la Universidad Politécnica de Madrid (1971)

Jorge Loredó Pérez

Doctor Ingeniero de Minas por la Universidad de Oviedo (1981)

Índice

1.	Resumen	5
2.	Introducción y antecedentes	5
2.1	Introducción	5
2.2	Antecedentes	7
2.2.1	Climatología	8
2.2.2	Encuadre geológico	9
2.2.3	Estratigrafía	10
2.2.4	Tectónica	12
2.2.5	Hidrogeología	13
2.2.6	Descripción y situación de los trabajos mineros	17
3.	Objetivos	29
4.	Materiales y metodología	29
4.1	Estudio climático	29
4.1.1	Validación de datos y obtención de series completas de precipitación	32
4.2	Estudio hidrológico	33
4.2.1	Caudales de máxima avenida	33
4.2.2	Aforos de caudal	36
4.2.3	Calidad de agua superficial	40
4.2.4	Caudal ambiental	40
4.2.5	Inventario de puntos de agua	40
4.3	Cubicación de volúmenes de huecos	41
4.3.1	Introducción	41
4.3.2	Principales conexiones entre los pozos Barredo y Figaredo	41
4.3.3	Cálculo de huecos	42
4.4	El embalse minero y el rebote del nivel piezométrico	45
4.4.1	Relación entre bombeo y recarga	45
4.4.2	Características hidrogeológicas de las formaciones permeables existentes	46
4.4.3	El embalse subterráneo	46
4.5	Hidroquímica del agua de mina	47
4.6	Modelo térmico	47
4.6.1	Factores que afectan a la conductividad térmica	48
4.6.2	Modelo de la media geométrica	49
4.7	Modelo hidrogeológico conceptual	50
4.7.1	Balance hídrico de la cuenca	52
4.7.2	Regulación del embalse subterráneo	52

4.8	Demanda de consumos domésticos, industriales y de agua caliente, calefacción y refrigeración de la zona de estudio	52
4.9	Análisis técnico-económico del aprovechamiento hídrico y energético	52
4.9.1	Aprovechamiento energético del agua de mina mediante bomba de calor	53
4.9.2	Posibilidad de aprovechamiento mediante minicentral hidráulica	54
4.9.3	Posibilidad de aprovechamiento del agua de mina para abastecimiento	56
5.	Resultados	56
5.1	Estudio climático	56
5.2	Estudio hidrológico	59
5.2.1	Cálculo del caudal de máxima avenida	59
5.2.2	Aforos de caudal	62
5.2.3	Calidad de agua superficial	65
5.2.4	Caudal ambiental	65
5.2.5	Inventario de puntos de agua	67
5.3	Cubicación de volúmenes de huecos	70
5.4	El embalse minero y el rebote del nivel piezométrico	74
5.4.1	Relación entre bombeo y recarga	74
5.4.2	Características hidrogeológicas de las formaciones permeables existentes	79
5.4.3	El embalse subterráneo	81
5.5	Hidroquímica del agua de mina	86
5.5.1	Temperatura del agua	90
5.6	Modelo térmico	91
5.6.1	Descripción litológica	91
5.6.2	Determinación de la porosidad	121
5.6.3	Determinación de la conductividad térmica	122
5.7	Modelo hidrogeológico conceptual	127
5.7.1	Balance hídrico de la cuenca	127
5.7.2	Regulación del embalse subterráneo	128
5.8	Demanda de consumos domésticos, industriales y de agua caliente, calefacción y refrigeración de la zona de estudio	129
5.9	Análisis técnico-económico del aprovechamiento hídrico y energético	132
5.9.1	Aplicación de la bomba de calor a las aguas de mina de la cuenca central asturiana	132
5.9.2	Aprovechamiento mediante minicentral hidráulica de las aguas de mina de la cuenca central asturiana	136
5.9.3	Aprovechamiento del agua de mina para abastecimiento	137
6.	Discusión y conclusiones	138
7.	Bibliografía	140
8.	Anexo I: tabla para estimación del umbral de escorrentía	143
9.	Índice de figuras	145
10.	Índice de tablas	148

1. RESUMEN

El proyecto de investigación que aquí se presenta pretende estudiar las posibilidades de aprovechamiento de las labores mineras de la Cuenca Carbonífera Central Asturiana como embalses subterráneos, tanto desde el punto de vista de su aprovechamiento hídrico, como energético, fundamentalmente mediante bombas de calor y minicentrales de bombeo. Con ello se pretende contribuir a la mejora de las condiciones económicas y sociales de un área tradicionalmente minera y en progresivo declive debido al cese de tal actividad.

En primer lugar, se ha recopilado la información necesaria para caracterizar desde varios puntos de vista (geológico, estratigráfico, tectónico, hidrogeológico y minero) la zona de estudio. En esta línea, se ha realizado un exhaustivo estudio climático cuyos resultados sean directamente aplicables a la zona, dada la enorme influencia que las variables climáticas (precipitación, evapotranspiración, etc.) tendrán en los trabajos posteriores. Apoyándose en éste, se ha realizado un extenso estudio hidrológico, incluyendo el cálculo de caudales de máxima avenida para la cuenca objeto de estudio, aforos diarios del río principal de esa cuenca, determinación de parámetros que caracterizan la calidad de ese agua superficial, estimación del caudal ambiental, así como un balance hídrico de la cuenca. Todos estos estudios se han realizado de forma íntegra, es decir, desde la búsqueda de métodos de obtención de datos hasta el tratamiento de los mismos para extraer conclusiones, en una cuenca de la que no existía información hidrológica.

Una vez clausurada la actividad de los diversos pozos mineros de la zona, se ha permitido el ascenso del nivel piezométrico hasta una cierta cota, con el subsiguiente ahorro de bombeo. Se ha tratado de analizar el proceso de inundación, así como la relación entre infiltración y precipitación, aspectos fundamentales para caracterizar el volumen de hueco disponible del que será el embalse minero de estudiar. Para la cubicación de los huecos asociados a los pozos Barredo y Figaredo ha sido necesario hacer un profuso trabajo de archivo para obtener el tonelaje extraído durante la vida activa de las minas, así como obtener información y recurrir al asesoramiento de expertos para caracterizar físicamente las labores, sus conexiones y los huecos residuales dejados una vez clausurada la actividad (en esto ha sido muy valiosa la ayuda facilitada por la empresa HUNOSA). El volumen de huecos así estimado se ha contrastado con el volumen de agua infiltrada durante la inundación, también calculada. También se ha estudiado la relación entre bombeo y recarga, así como las características hidrogeológicas de las formaciones geológicas presentes, con el objeto de caracterizar, de la forma más precisa posible el embalse minero, estableciendo un modelo conceptual de entradas y salidas, que serviría para establecer las bases de su posible regulación como 'embalse subterráneo'.

Se ha caracterizado la calidad del agua de mina de los diversos pozos mineros de cara a su posible aprove-

chamiento y se ha realizado un análisis sencillo de las posibilidades de aprovechamiento energético del agua de mina almacenada en el embalse minero Barredo-Figaredo mediante bomba de calor, con un consumo energético menor que la energía térmica facilitada, la cual puede ser aprovechada para la calefacción/refrigeración de edificios diversos de la zona (se han realizado encuestas de demanda local). En esta línea, se ha intentado avanzar en el establecimiento del modelo térmico del embalse; puesto que la conductividad térmica de los materiales es una variable fundamental para definir la transferencia de calor, ésta ha sido calculada para las litologías del entorno del pozo Barredo, a partir de la toma de muestras en campo, sobre las que se realizaron estudios en lámina delgada al microscopio y se determinaron varios parámetros en laboratorio (se espera continuar en esta línea de trabajo en el futuro). Finalmente, se ha planteado también el aprovechamiento hidroeléctrico del agua de retorno al pozo mediante minicentral de bombeo, tras ser usada como fuente de energía geotérmica. Para ambas aplicaciones del agua de mina se ha realizado una valoración económica.

2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

2.1 Introducción

La introducción de la Directiva Europea Marco del Agua ha supuesto un cambio en la forma de contemplar la protección del medio hídrico. El nuevo sistema integrado requiere una gestión holística de aguas superficiales y subterráneas a escala de cuenca hidrográfica (Winter et al., 1998), a fin de conseguir un buen estado químico y ecológico de las aguas, y, en particular, evitar el deterioro de las aguas subterráneas y revertir el que ya pudiera existir. El primer paso para conseguir estos objetivos es caracterizar las posibles fuentes de riesgo e identificar las cuencas con posibilidad de ser afectadas.

Es bien conocido que la actividad minera puede generar impactos hidrogeológicos de variable entidad. La mayor parte de las labores mineras, ya sean a cielo abierto o subterráneas, interceptan el nivel piezométrico y obligan al establecimiento de un sistema de bombeo, el cual, si es interrumpido tras la clausura de la actividad, traerá consigo una inundación parcial o total de los huecos mineros. También las labores desarrolladas en la zona no saturada, pueden recibir por infiltración aguas que circularán por los huecos mineros y en ambos casos se pueden derivar incidencias en la calidad de estas aguas, superficiales y subterráneas, así como problemas hidrogeológicos y/o geotécnicos (Fernández-Rubio, 2002). Estos aspectos han de tenerse en cuenta desde los inicios del proyecto minero, ya que los trabajos de prospección, explotación y restauración condicionarán el comportamiento hidrogeológico futuro de la zona afectada. Pese a que no ha sido así a lo largo de la historia, la legislación vigente, así como un mayor compromiso y concienciación hacen que las actuales actuaciones vayan orientadas a analizar, identificar y

eliminar los posibles efectos negativos e incluso obtener balances positivos, derivados por ejemplo del aprovechamiento de los huecos mineros como 'embalse subterráneo' o la gestión de las 'aguas de mina' como recursos hídricos.

La apertura de huecos durante el desarrollo de una operación minera suele alterar el flujo natural del agua subterránea y establecer nuevas direcciones de flujo. Los nuevos huecos desarrollados, así como las redes de sondeos o perforaciones de diversa índole interceptando varias formaciones geológicas pueden favorecer la interconexión de acuíferos antes no comunicados (con posible incidencia sobre la calidad de estas aguas 'mezcladas'). La presencia de labores mineras hace que se establezca una red de conductos interconectados que permite la circulación hídrica a su través. Así, se genera un acuífero "pseudocárstico" artificial en un macizo en el que inicialmente podrían únicamente existir niveles de baja transmisividad. Por otra parte, la propia actividad minera, a partir de la generación de huecos y la práctica de hundimiento y/o de relleno genera modificaciones de porosidad y permeabilidad en los materiales suprayacentes a las labores, e incluso fenómenos de subsidencia, estableciéndose nuevas conexiones o dificultando otras preexistentes, que pueden afectar al flujo natural de aguas superficiales y subterráneas.

Una vez iniciadas las labores mineras, el drenaje de los niveles permeables, así como del agua que se infiltra a través de las mismas, se realiza a través de los huecos mineros. Se hace pues, imprescindible establecer un sistema de bombeo para evacuar dicho agua fuera de las labores, generalmente durante extensos periodos de tiempo, lo cual supone un importante coste para las empresas mineras y, en algunos casos, alteraciones del balance de los acuíferos afectados (Fernández-Rubio et al., 1986). Además, la extracción en exceso de agua subterránea puede derivar en una reducción del caudal de base de los ríos próximos o incluso en cambios de la dirección del flujo del agua subterránea, con transformaciones de ríos ganadores en perdedores, dependiendo del gradiente hidráulico local y del grado de conexión hidráulica entre río y acuífero, así como de factores tales como las características geológicas y geomorfológicas de la zona, el área de la cuenca de aporte, la intensidad de recarga, etc. (Younger et al., 1993; Rushton, 2003). Por otra parte, el agua bombeada desde el interior de los huecos mineros suele ser –tras asegurarse de que mantiene una calidad adecuada– vertida a cauces próximos, por lo que debe contemplarse la reducción de caudal que algunos cauces sufrirán ante un futuro cese de bombeo. Los impactos derivados del bombeo de agua subterránea pueden ser evaluados mediante una serie de herramientas que van desde simples balances a complejos modelos numéricos (Parkin et al., 2007). Los ríos de la Cuenca Central Asturiana son, en general, ganadores y aquellos receptores de caudales de extracción experimentan un aumento de su caudal por este motivo.

Una vez finalizada la explotación, se plantea la opción del abandono del bombeo, procediéndose a la inundación

del hueco minero. La circulación libre del agua subterránea tras el cese del bombeo conducirá al restablecimiento del equilibrio potenciométrico, fenómeno conocido como 'rebote' del nivel piezométrico (cuya nueva posición puede no coincidir con la original). Por tanto, el flujo de agua subterránea durante la vida activa de la mina será muy diferente al esperable tras su clausura (Younger et al., 2002). Tras la actividad minera, el comportamiento del sistema hidrogeológico local puede verse modificado, como consecuencia de la posible interconexión entre acuíferos, la generación de un "nuevo acuífero pseudocárstico" o la conexión entre aguas superficiales y subterráneas. Así, por ejemplo, cuando existe un acuífero confinado subyacente, la descompresión provocada por el hueco minero puede ocasionar aportes de aguas profundas a través de perforaciones, fallas o fracturas creadas por la presión, y en ocasiones, el aporte de agua puede proceder de acuíferos laterales o colgados o incluso de cauces de aguas superficiales con conexión hidráulica profunda que fue necesario desviar antes del desarrollo de la explotación (Fernández-Rubio, 2002).

La actividad minera también incrementa la superficie de mineral expuesto a oxidación, cuyos productos puedan finalmente entrar en contacto con el agua subterránea. Es un hecho aceptado que la recuperación del nivel piezométrico tras la interrupción del bombeo en áreas mineras de carbón generalmente resulta en la afección a la calidad de las aguas subterráneas en contacto con las capas explotadas, pues los minerales sulfatados formados por la oxidación de la pirita, a menudo frecuente en estos yacimientos, entran rápidamente en solución (Burke et al., 2005; Younger, 1998; Younger, 1997). La alteración de la calidad de este agua puede variar de leve a severa, dependiendo de la reactividad de mineral y estéril, o la capacidad de neutralización y filtración de las formaciones geológicas adyacentes, entre otros factores (Younger, 1994), pudiendo incluso producirse impactos ecológicos severos (Jarvis y Younger, 1997) que persistan durante décadas (Younger, 1997). El tratamiento de este tipo de descargas ha sido objeto de profuso estudio y numerosas publicaciones (Singer y Stumm, 1970; Kleinmann et al., 1981; Kleinmann, 1985; Kleinmann et al., 1988; Hedin et al., 1994; Wilderman et al., 1994; PIRAMID Consortium, 2003; Watzlaf et al., 2004). En el caso concreto de la Cuenca Central Asturiana, el bajo contenido de sulfuros en el carbón, así como la presencia abundante de materiales carbonatados que actúan como tampón, hacen que el problema de la generación de aguas ácidas y ferruginosas sea relativamente reducido, si se compara con el sufrido en áreas carboníferas como las del Nordeste de Inglaterra o el Oeste de Estados Unidos.

La problemática asociada a los impactos hidrogeológicos de la minería subterránea es tan variada como la casuística de tales actividades mineras, ya que en cada zona y casi en cada mina habrá particularidades que la definan; sin embargo, existen el conocimiento y la tecnología adecuados para conseguir controlar y reducir al mínimo los efectos negativos derivados, tanto durante el pe-

riodo de actividad de la mina como tras la clausura de la misma. Tendrán especial interés aquellos métodos (modelos) de ayuda a la predicción del comportamiento del agua subterránea durante el proceso de inundación de las labores mineras (Burke y Younger, 2000).

La larga historia de la minería asturiana ha provocado una fuerte alteración en los niveles potenciométricos y en el flujo natural de los acuíferos en las áreas afectadas. Las explotaciones han dado lugar a un acuífero de triple porosidad (Pendás et al., 2002); donde antes había pequeños acuíferos en arenisca de un sistema multicapa de pequeña entidad, ahora se han generado galerías mineras y zonas fracturadas que funcionan como acuíferos asimilables a los kársticos (Pendás y Loredó, 2006). De hecho, como se verá más adelante, el conjunto de los huecos provocados por la minería del carbón en la Cuenca Central Asturiana funciona como un gran embalse subterráneo.

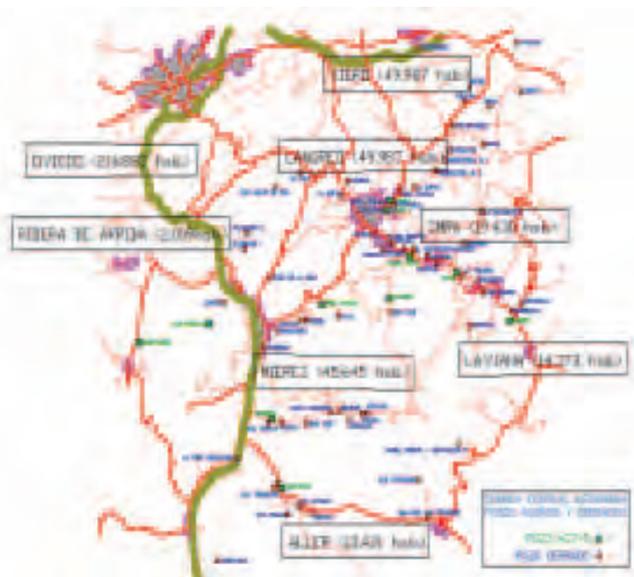


Figura 1. Ubicación de los pozos de HUNOSA respecto a núcleos de población

En la actualidad, el bombeo de las aguas infiltradas supone un importante cargo económico para las empresas mineras. Ante esto, para optimizar el uso de los recursos económicos, se estudió una primera opción de cese del bombeo en los pozos cerrados, procediéndose a la inundación del hueco minero. Sin embargo esta solución no es siempre aplicable, debido a la singularidad de las explotaciones y las interconexiones creadas tras cientos de años de minería. Dada la proximidad de los pozos a núcleos de población de la cuenca (Fig. 1), las características físico-químicas de las aguas, y como consecuencia de la elevación de los costes de la calefacción y refrigeración convencional, comienza a verse viable el aprovechamiento de este agua como doble recurso: hídrico –posible fuente de suministro de agua a determinados usos - y energético -suministrando calor mediante el uso de redes calóricas con bombas de calor-.

2.2 Antecedentes

El área de estudio está localizada en el sector central de Asturias, dentro de la Cuenca Carbonífera Central, y más concretamente en la margen oriental del río Caudal, entre los valles de los ríos San Juan, situado al norte del sector y Turón.

La extensión de esta zona se ha definido en función del área de influencia de las labores mineras, tanto de valle como de montaña, que presentan conexiones en este sector, y que pueden afectar o verse afectadas por la inundación de los pozos (Barredo, San José, Santa Bárbara, Figaredo). Fuera del área de estudio quedan las labores mineras de Santiago, San Antonio y San Jorge, las cuales se mencionarán y explicarán brevemente en el apartado 2.2.6, en el que se hace un pequeño resumen de las labores mineras que afectan a la zona, por estar comunicadas con las anteriores, y por tanto podrían ejercer una posible influencia durante las labores de inundación.

El área abarca el sur del término municipal de Mieres, el sector noroccidental del término municipal de Aller y una pequeña parte del sector nororiental del término municipal de Lena. La superficie de terreno comprendido entre sus límites supone un área aproximada de 140 km².

Topográficamente 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.

Este sector se encuentra situado a unos 70 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 durante 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.

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 Turón, que discurre, desde su nacimiento próximo a la localidad de Urbiés, en dirección E-O, desembocando en el río Caudal a la altura de la localidad de Figaredo y la llanura aluvial del río Caudal, que, a su paso por la localidad de Mieres, incluye los alrededores del Pozo Barredo y el entorno de terreno que drena hacia dicho pozo. Estos ríos tienen un régimen torrencial, con abundantes aportes procedentes de arroyos.

Desde el punto de vista hidrológico, el área de influencia de la zona de estudio abarca los límites de las cuencas hidrográficas anteriormente mencionadas dentro de las cuales se encuentren las labores mineras que han modificado su carácter hidrológico, como son los pozos mineros Barredo, San José, Santa Bárbara y Figaredo y las minas de montaña de la zona.

2.2.1 Climatología

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.

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.

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 ob-

serva 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.

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).

2.2.2 Encuadre geológico

La Cuenca Carbonífera Central de Asturias (en adelante CCC), entorno en el cual se ubica la zona de estudio, se encuentra ubicada en la zona centro-meridional del Principado de Asturias, siendo una de las unidades mejor definidas. Su forma se acomoda a la disposición general de la Rodilla Astúrica, prolongándose largamente por el extremo suroriental de la Zona Cantábrica.

El conjunto está cabalgando en sus bordes occidental y meridional (Región de Pliegues y Mantos) y cabalga a su vez sobre las unidades del Manto del Ponga y la Región de Mantos situadas al este, originando en su frente algunas escamas asociadas, que forma tránsito con ella. El emplazamiento de estos mantos, cuyos frentes presentan generalmente dirección N-S, obedece a empujes que provienen del oeste y que han dado lugar a los cabalgamientos de la Región de Pliegues y Mantos sobre la CCC y a los de ésta sobre la región de Mantos, así como a distintos sistemas de fallas inversas.

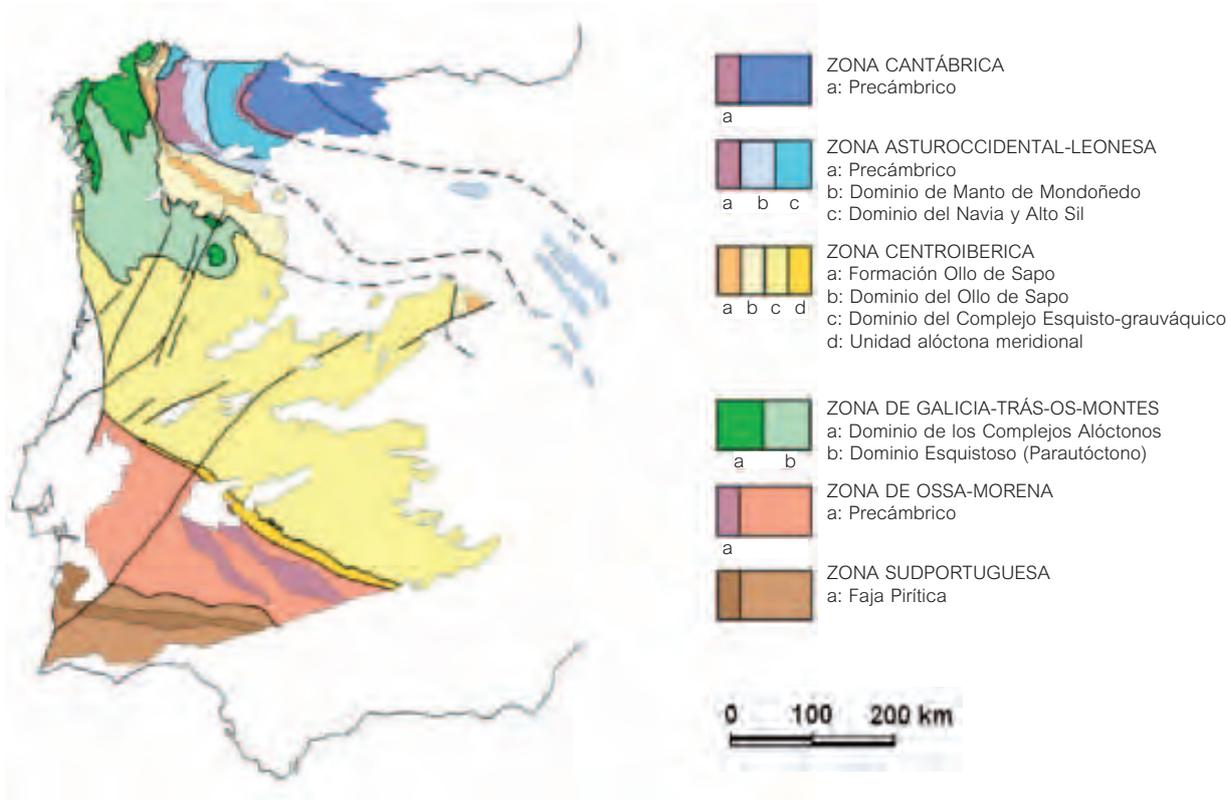


Figura 2. División del Macizo Ibérico (Vera *et al*, 2004)

Dentro de la CCC se distinguen dos unidades separadas por un accidente tectónico de dirección NNE-SSO, conocido como falla de La Peña, de características estratigráficas diferentes. Al NO se encuentra la Unidad de Riosa-Olloniego, denominándose el resto Unidad de Aller-Nalón. Dentro de ellas se diferencia la serie productiva, donde se concentran principalmente las explotaciones, y la improductiva, de escasa importancia minera.



Figura 3. La Cuenca Carbonífera Central: Unidades y delimitación del paquete improductivo (González y Rebollar, 1986)

Los materiales que forman la CCC son principalmente carboníferos. Por el NE la cobertera mesozoica oculta los materiales de la Cuenca, cuya prolongación es visible por la existencia de algunos afloramientos aislados del zócalo que sobresalen por la superficie (González y Rebollar, 1986).

Estos materiales aparecen muy replegados, originando estructuras complejas. En líneas generales se observa la estructura de un sinclinal originada por interferencia de pliegues, con dirección axial NE-SO, y cuyo núcleo principal se sitúa en la zona de Sama, y otro accesorio en la de El Entrego.

La prolongación meridional de esta estructura define dos nuevos sinclinales, uno con dirección E-O, siguiendo el valle de Turón, y otro con dirección axial N-S en la zona de Moreda y perpendicular al anterior. Es en estos sinclinales en los que se encuentran los principales niveles productivos.

2.2.3 Estratigrafía

Estratigráficamente la CCC está formada por una serie de parasecuencias costeras formadas por una sucesión cíclica de margas y lutitas (pizarras), areniscas y capas de carbón, que se agrupan en Paquetes. La columna estratigráfica del Carbonífero productivo tiene una potencia de más de 6.000 m y en ella existen más de 60 capas de carbón con potencias que varían entre los 0,5 y los 1,5 m, y que presentan una gran continuidad en toda la cuenca.

Haciendo una revisión de muro a techo, sobre la Fm. Alba o Caliza Griotte, representada en el borde oriental por

calizas rojizas de 25 m de espesor medio, que marcan el inicio de la sedimentación Carbonífera, aparecen las Fm. Barcaliente y Valdeteja (o Caliza de Montaña), constituidas por calizas masivas de color gris oscuro y que se encuentran frecuentemente plegadas, lo que hace difícil determinar su espesor.

A continuación aparecería la Unidad Aller-Nalón, en la que las capas de carbón se encuentran divididas principalmente en dos grupos. En primer lugar aparecería el Grupo Lena o paquete improductivo, formado principalmente por calizas entre las que aparecen intercalaciones de carbón, sobre el que se encuentra el Grupo Sama o paquete productivo y que está formado por areniscas y otras rocas de ambiente continental intercaladas con lechos explotables de carbón y con niveles ocasionales de calizas.

El **Grupo Lena** incluye los siguientes paquetes:

- Paquete Fresnedo: conjunto monótono de pizarras con intercalaciones de areniscas.
- Paquete Levinco: calizas grises con intercalaciones de areniscas y pizarras arcillosas o arenosas con delgadas vetas de carbón.
- Paquete Llanón: grupo de capas de carbón con una potencia media de 480 m, entre los valles del Turón y del Aller.
- Paquete Tendeyón: serie de bancos de cuarcitas y pizarras.
- Paquete Caleras: secuencia de pizarras con 5 o 6 vetas de carbón.

El **Grupo Sama** incluye los siguientes paquetes:

- Paquete Generalas: base formada por un nivel marino de calizas continuas, interrumpido por un carbonero de suelo de vegetación (más al este desaparece el carbón, que se ve sustituido por niveles de calizas). Sobre el nivel marino descansa un tramo continental arenoso con lechos de carbón.
- Paquete San Antonio: constituido por cinco capas de carbón en el Oeste, dos en el Este y tres en el Sur, que descansan sobre el Paquete Generalas. Los techos de las capas son continentales en las Zona de Poniente y marinos en el resto.
- Paquete María Luisa: comienza con un tramo continental con varios pisos de carbón, de los que dos o tres son explotables. Sobre este tramo aparece un nivel marino con intercalaciones de capas de carbón, y por encima de este un nuevo nivel continental con de siete a diez vetas de carbón con frecuentes techos de pizarras. El paquete finaliza con dos nuevos tramos marinos con pasos de carbón, entre los que descansa un tramo continental con dos o tres capas de carbón.
- Paquete Sotón: paquete formado por un grupo de capas que varían de ocho a doce, alternándose sedimentos marinos y continentales. El primer nivel, que es continental, presenta entre cuatro y nueve pasos de carbón, de los que uno o dos son explotables. En los tres siguientes niveles aparecen numerosas vetas de carbón.

- Paquete Entrerregueras: paquete formado por un nivel continental con varios carboneros bajo el cual aparece un nivel en el que se intercalan dos o tres pasos de carbón. Sobre el nivel continental yace un tramo marino predominantemente arenoso. El paquete finaliza con un conjunto de tramos continentales con abundantes pasos de carbón separados por un nivel marino de pequeño espesor.
- Paquete Sorriego: base formada por un potente nivel marino con un delgado paso de carbón, sobre el que yacen dos niveles continentales separados por un nivel marino. En la mitad superior hay una gran densidad de capas.
- Paquetes Modesta y Oscura: estos paquetes afloran casi exclusivamente en las zonas más septentrionales de la cuenca. Presentan una capa de gonfolita y un gran número de capas de carbón.

En la zona más occidental de la CCC aparece la denominada Unidad de Riosa-Olloniego, donde la estratigrafía es totalmente diferente. En esta Unidad aparece lo que en minería se ha denominado Hullero productivo de Riosa, constituido por una banda productiva que se arquea desde Riosa a El Viso, por el borde Oeste de la CCC. Debido a las características de los tramos y a la intercalación de potentes conglomerados, es difícil correlacionar esta zona con el resto de la cuenca. El Hullero productivo de Riosa está formado por los paquetes Canales, Pudingas (o Entrerregueras), Esperanza, Ablanedo y Grandiella.

A continuación se muestra un corte geológico a cota -100 m, de la CCC donde se aprecian las trazas de los paquetes descritos:

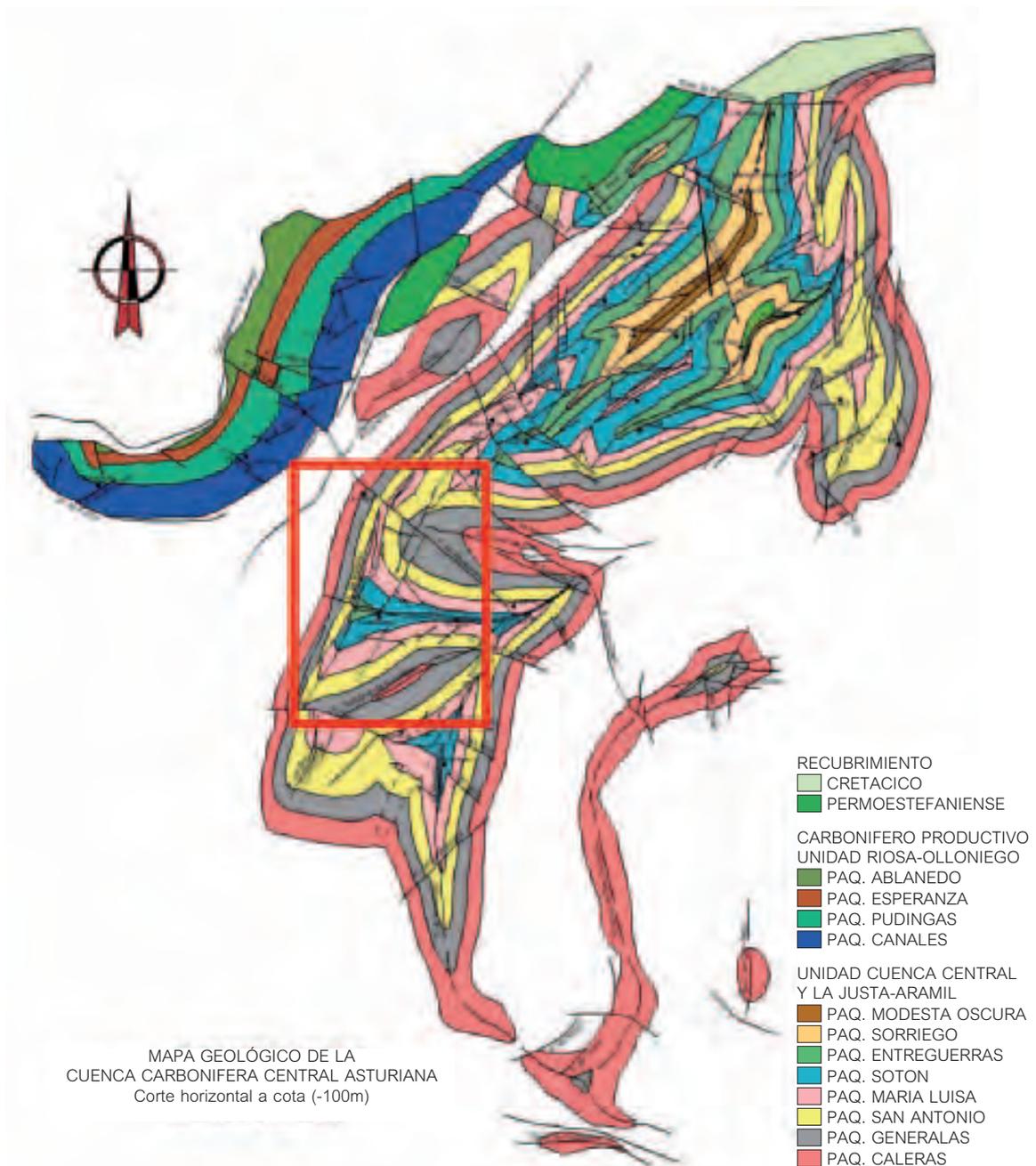


Figura 4. Mapa Geológico de la CCC a cota -100 m. (ENADIMSA, 1976), con la zona de estudio enmarcada

Estratigrafía de la zona de estudio

Prácticamente todos los materiales presentes en la zona de estudio son de edad Paleozoica (Carbonífero), existiendo únicamente una pequeña representación de sedimentos Cuaternarios, tanto en depósitos aluviales de los ríos Caudal, Turón y Aller como eluviales y coluviales, a los que hay que sumar los de carácter antrópico.

Los materiales del Carbonífero son de la Serie Superior o Productiva, estando representados el segundo, tercero y cuarto tramo, todos ellos dentro del Westfaliense D:

El Segundo Tramo Productivo (H_{23-24}^{B3-B1}) comprende los paquetes Caleras, Generalas y San Antonio, con una potencia media de 950 m. Está formado por seis episodios marinos que reúnen el 75% del total de sedimentos, alternando con otros seis continentales. En los continentales se encuentran niveles típicos de este ambiente, como son: capas de carbón, algunas de ellas explotables, pizarras de techo con plantas y claros suelos de vegetación, dispuestos según el ciclotema: carbón - pizarras de techo - pizarra arenosa - arenisca - suelo de vegetación - carbón. Este ritmo se repite de dos a cuatro veces en cada uno de estos episodios, faltando en ocasiones algunos de sus términos y variando el carácter de otros; así ocurre con la pizarra de techo, que suele tener plantas flotadas en los primeros ciclotemas y fósiles marinos o pasa a un nivel calizo en el último. Las areniscas, por su parte, cambian la tendencia cuarcítica que muestran en los estratos de muro, en beneficio de las de tipo calcáreo en los estratos superiores, llegando a formar gruesos bancos de micropudingas calcáreas al final de los tramos marinos. Los episodios marinos, mucho más potentes que los anteriores, se caracterizan por estar formados por un conjunto de pizarras arcillosas, arenosas, calcáreas, etc., con abundantes niveles de fauna marina, sobre los que se apoyan o intercalan secuencias más arenosas; y por la aparición, aunque tímida, de pasos de carbón, que cuando lo hacen, presentan techo marino y sólo algunos centímetros de espesor. La base de los tres primeros episodios está formada por bancos de caliza de 5 a 10 m de potencia.

El Tercer Tramo Productivo (H_{24-24}^{B1-B2}) comprende los paquetes María Luisa y Sotón, que con una potencia de 750 m son los más explotados dentro de la cuenca carbonífera. Sobre el último tramo marino del paquete San Antonio, que culmina con un grueso banco de micropudingas conocido con el nombre de La Voz, se inicia una sedimentación en la que se suceden alternativamente los episodios marinos y continentales, indicando el carácter rítmico de las invasiones marinas. En las continentales, que suponen un 45% del espesor total de sedimentos, aparecen numerosas capas de carbón, muchas de ellas explotadas en la actualidad. Los marinos, por su parte, están formados por pizarras con fauna marina, que alternan con areniscas calcáreas de marcada tendencia a micropudinga. En la mitad inferior de la serie, es decir, en los estratos correspondientes al paquete María Luisa, se diferencian tres tramos continentales y tres marinos de espesores comparables, siendo el segundo de los continentales el más potente de todos los reconocidos de este ambiente dentro de la cuenca. En una

de las capas del último tramo continental se sitúa estratigráficamente el tonstein Lozanita (García-Loygorri et al., 1971), excelente nivel guía dentro de la cuenca.

El Cuarto Tramo Productivo (H_{24-24}^{B2-B3}) en la Cuenca Central comprende los paquetes de Entrerregueras, Sorriego, Modesta y Oscura, con un espesor medio de 1.125 m, pero en el área Barredo-Turón no afloran los paquetes Modesta y Oscura. Los paquetes de Entrerregueras y Sorriego tienen un espesor de 650 m, aunque en la zona de estudio sólo aflora el paquete Entrerregueras, con un espesor medio total de 340 metros y que tiene como característica la presencia de varios bancos de conglomerados calcáreos (gonfolitas, según la denominación local). La base de este paquete comienza con un tramo marino, de 130 m al que le siguen dos tramos continentales interrumpidos por un tramo marino de 60 m; la presencia de estos estratos marinos es un fenómeno que no se había producido desde el paquete San Antonio. Los tramos continentales contienen las principales capas explotables que oscilan entre 3 y 8 capas según la zona, pero que no fueron explotados por el pozo Figaredo, único de los estudiados en cuyas concesiones se encuentra este paquete.

2.2.4 Tectónica

Como ya se dijo, todos los materiales de la zona CCC aparecen muy replegados. En líneas generales, como se representa en la Figura 5, se observa la existencia de una estructura sinclinal más o menos compleja, originada por interferencia del sinclinal de Sama (de dirección axial NE-SO, y cuyo núcleo principal se sitúa en la zona de Sama) y otro accesorio en la zona de El Entrego.

El sinclinal de Sama se extiende desde el extremo norte, donde tiene un cierre perisinclinal, en el pozo Mosquitera, hasta el río Nalón, donde se divide en dos sinclinales, con un anticlinal intermedio, que son el sinclinal de Barredo al O, el sinclinal de Baltasara al E y el anticlinal complejo de Santa Rosa. De estas estructuras sólo el Sinclinal de Barredo afecta claramente a la zona de estudio, afectando parcialmente el anticlinal complejo de Santa Rosa.



Figura 5. Principales estructuras de la CCC (IGME, 1975), con la zona de estudio enmarcada

El anticlinal complejo de Santa Rosa comprende un par de pliegues apretados y agudos, que en conjunto constituyen un pequeño anticlinorio con una ligera vergencia al E o SE. El cabeceo de los ejes es hacia el SO.

El Sinclinal de Barredo se inicia en La Cobertoria y se trata de un sinclinal asimétrico, volcado al E con su flanco oriental tendido, con buzamientos que oscilan normalmente entre 20° y 40° al O, y el costado occidental invertido, inclinado de 60° a 80° asimismo a Poniente. La superficie axial está enmascarada por una importante falla inversa que la acompaña en toda su extensión y que ha montado el flanco occidental sobre el oriental. El cabeceo del eje es claramente al N, a partir de la falla de Mieres, mientras que al S de ésta es manifiestamente meridional, coadyuvando a ello la intersección con la superficie axial del sinclinal de Turón, de rumbo E-O (IGME, 1975). Este sinclinal de Barredo está además afectado por la falla del mismo nombre y la de Peñón y Cortina, de características similares. En el flanco occidental, invertido, afloran los paquetes existentes desde Caleras hasta la parte baja de Sotón, mientras que en el oriental únicamente aparecen los paquetes María Luisa y Entrerregueras.

Tras el sinclinal de Barredo los pliegues más importantes de esta zona son el sinclinal de Turón, del sistema radial, y el anticlinal de Revallinas.

El sinclinal de Turón, de rumbo E-O, se trata de una estructura del sistema radial cuyo eje se inclina hacia el O presentando ligeros cabeceos. Sus flancos presentan fuertes buzamientos y los cabeceos del eje son 31° al O, en el extremo oriental; 12° al E, en el pozo San José; y unos 22° al O, en las cercanías de Figaredo. Su superficie axial es subvertical y es acompañado en todo su recorrido por la falla rumbo-deslizante de Podrizos, asociada al plano axial del pliegue, de plano subvertical, con movimiento horizontal de cierta importancia. Este pliegue aparece afectado por tres fallas del sistema longitudinal: Piedrafita, Santo Tomás y Villandio.

El anticlinal de Revallinas, elemento de enlace entre el sinclinal de Turón y el Carbonífero del valle del Aller, tiene su plano axial arqueado hacia el O, con fuerte vergencia al N, cabeceando suavemente su eje al NO. Es un anticlinal asimétrico, cuyos flancos mantienen buzamientos suaves, horizontalizándose en su charnela. Se presenta afectado por la falla de Gramedo, se amortigua hacia la falla de Barredo, queda cortado por la falla de Tablado y Canto Carbonero. En él afloran los paquetes Generalas, San Antonio y María Luisa.

2.2.5 Hidrogeología

La zona de estudio (Figura 6) se encuentra incluida en la que actualmente se denomina Masa de Agua 012.012 Cuenca Carbonífera asturiana (Dirección General del Agua, 2005). Como ya se ha dicho, los materiales presentes en la zona de trabajo incluyen lutitas, limonitas, areniscas, microconglomerados, conglomerados, calizas y capas de carbón de edad carbonífera, y depósitos cuaternarios: aluviales, coluviones y antrópicos (escombreras, rellenos compactados, rellenos heterogéneos), aunque de éstos solo los aluviales están representados en la cartografía hidrogeológica. Podemos decir, por tanto que, desde un punto de vista hidrogeológico, la zona de estudio se caracteriza por estar formada por materiales predominantemente impermeables o muy poco permeables, que aunque pueden formar pequeños acuíferos, estos no tendrán una gran importancia. En general la zona se comporta como un acuífero multicapa de muy baja porosidad y permeabilidad, donde las areniscas actúan como almacenes limitados, y las pizarras y las capas de carbón como capas confinantes, por lo que se puede decir que las pequeñas zonas capaces de almacenar agua, y que tienen conductividades hidráulicas muy variadas, se superponen y entremezclan, creando un sistema de flujo complejo y con diferentes niveles piezométricos separados por zonas no saturadas (González y Rebollar, 1986).

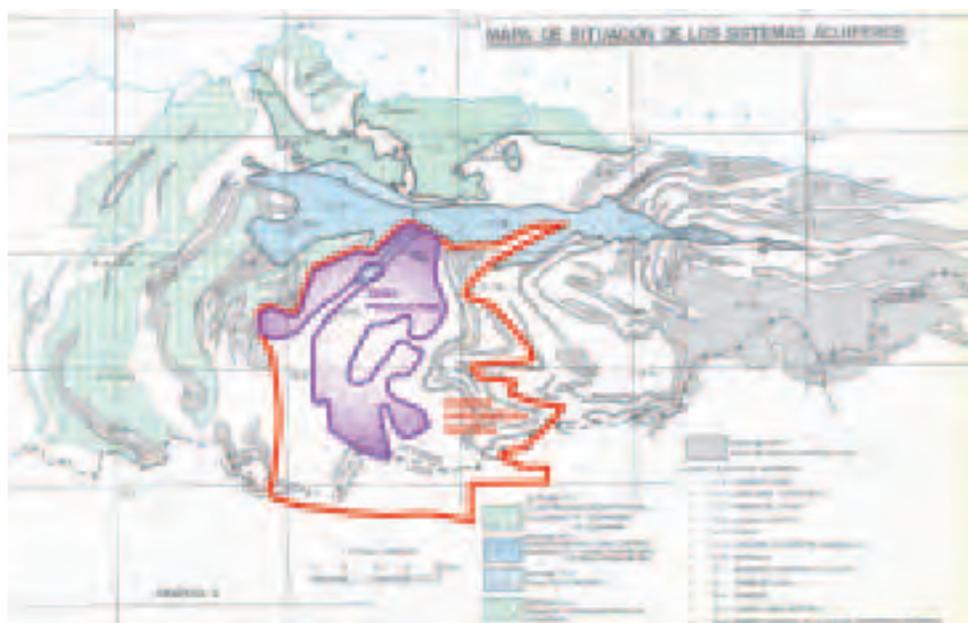


Figura 6. Sistemas acuíferos de Asturias con la ubicación de la CCC (IGME, 1984)

Según la permeabilidad de los materiales presentes se establecen cuatro conjuntos principales, de los que los tres primeros corresponderían a sedimentos carboníferos:

- 1. Materiales de permeabilidad muy baja:** 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. 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 5×10^{-6} y 10^{-6} m/s en condiciones de macizo natural fracturado. Estas observaciones implican un macizo virgen prácticamente impermeable.
- 2. Materiales de baja permeabilidad por fisuración:** representados por cuarcitas, areniscas calcáreas y arcillosas, microconglomerados silíceos (micropudingas) y conglomerados silíceos (pudingas); el valor de su conductividad hidráulica está relacionado con el grado de fisuración, aunque en general los valores son poco elevados.
- 3. Materiales de permeabilidad variable por fisuración y 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, 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.
- 4. Materiales de permeabilidad variable por porosidad intergranular:** estos materiales están 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 en la que se ubica el Pozo Barredo, estos sedimentos presentan espesores no superiores a los 10 metros, estando situado el nivel freático en torno a los 5-7 metros de profundidad. Los valores de conductividad hidráulica obtenidos a partir de los ensayos geotécnicos realizados sobre estos materiales oscilan en el rango de magnitud de 10^{-5} a 10^{-6} m/s para arenas arcillosas y arcillas arenosas, y en el rango de 10^{-4} y 10^{-5} m/s para gravas (IG, 1998, 1999; INYTRAM, 2006; INCOSA, 2007; Investigación y Control de Calidad, S. A., 2007).

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 y los grandes huecos ocasionados por las labores mineras, cuyo origen es antrópico.

Las únicas vías de circulación son por tanto las fracturas abiertas y las zonas de descompresión asociadas a ellas, lo que supone que el comportamiento hidráulico de la formación está más asociado a la fracturación que a la litología.

La alimentación de los acuíferos es principalmente por aportes directos del agua de lluvia, y en menor cuantía por la infiltración del agua de escorrentía. Es por esto que se considera que el macizo rocoso está formado en sentido vertical por tres zonas superpuestas, condicionadas estas por los fenómenos de la alteración en superficie. El esquema de funcionamiento hidráulico sería:

- En el suelo de naturaleza arcillosa, de algunos cm. de espesor y de permeabilidad generalmente reducida, se constituye un pequeño acuífero alimentado por la lluvia y que retiene el agua ayudado por la cubierta vegetal.
- La zona rocosa que aparece bajo el suelo y que generalmente aparece fisurada, descomprimida y alterada, con zonas de circulación preferente a favor de las fisuras, está alimentada por el agua almacenada en el acuífero superior o directamente por la lluvia en los casos en los que no hay suelo.
- Estas fisuras, cuando continúan abiertas en profundidad, alimentan a la siguiente zona de roca sana.

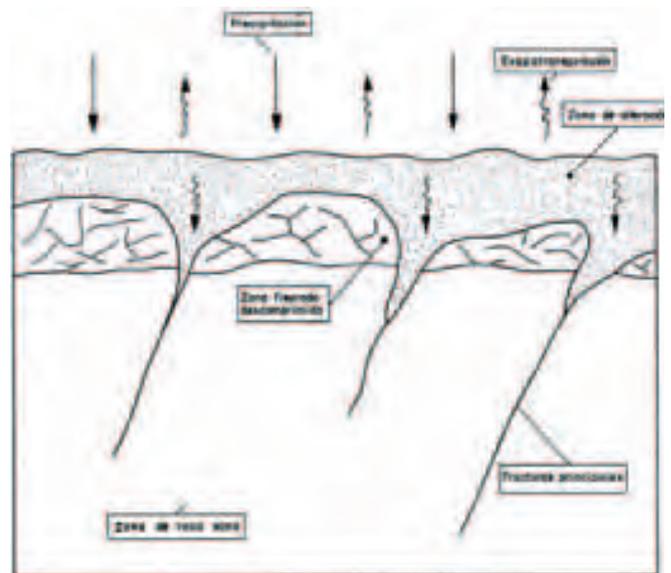


Figura 7. Esquema de funcionamiento hidrodinámico (González y Rebollar, 1986)

En consecuencia, en condiciones normales y antes del inicio de la actividad minera, existirían numerosas fuentes de muy bajo caudal en aquellos niveles de mayor permeabilidad y que desaparecerían al iniciarse las explotaciones.

Afección de las labores mineras

Cuando los sedimentos atravesados por las labores tienen carácter permeable y reciben aportaciones exteriores de agua de lluvia, se establece una diferencia de presiones entre la superficie de interferencia de la labor con cada nivel permeable, junto a una interconexión de las fisuras (o huecos) de estos niveles con el propio hueco de la labor y, en consecuencia, de esta última con la superficie de recarga del acuífero (afloramiento del mismo). Por lo que lógicamente se origina una circulación gravitacional inducida del agua subterránea, procedente de cada nivel acuífero afectado, hacia el espacio libre asociado a la labor, creándose así unos mecanismos artificiales de drenaje del sistema hidrogeológico, cuya cuantía es más o menos importante en función de la importancia de la diferencia de presiones provocada y de la permeabilidad de cada acuífero. Las labores mineras, pues, constituyen en conjunto unas captaciones complejas y muy extensas que, con más o menos rapidez, drenan los tramos acuíferos vinculados a ellas (Arquer et al., 2006). En la tercera de las zonas descritas anteriormente, la más profunda, constituida por roca sana, dada su baja o muy baja permeabilidad, el agua circula por conductos preferenciales de escasa o nula capacidad de almacenamiento y de baja conductividad hidráulica. Este hecho indica que la capacidad de retención y circulación de agua en las zonas de alteración y de descompresión es pequeña.

La descarga que la intersección de las labores mineras provoca en los tramos litológicos permeables del sistema hidrogeológico en el que se desarrollan, tiene como resultado un descenso de la superficie piezométrica de cada acuífero, íntimamente condicionado por el balance hídrico del mismo en los distintos momentos. Es decir, si el caudal aportado al acuífero fundamentalmente por infiltración del agua de lluvia resulta superior al drenado por

manantiales y, de manera artificial, por las labores mineras, el acuífero permanecerá saturado de agua y sus puntos de descarga permanecerán activos. Si, por el contrario, la aportación hídrica es inferior a las descargas, la superficie piezométrica del acuífero sufrirá un descenso progresivo hasta las cotas más bajas de drenaje, provocando la desaparición de los manantiales a él vinculados.

La minería de la CCC comenzó con una fase de minería de montaña, donde el arranque de carbón se producía en talleres entre dos galerías a diferente cota. Durante ésta, produjo el deshulle del paquete productivo desde el nivel del valle hasta el afloramiento de las capas en superficie. Una vez agotado el yacimiento la explotación continuó mediante pozos verticales o inclinados que facilitan el acceso a cotas inferiores. Esto propició la apertura de galerías principales en roca, de mayor sección, desde las que se accedía a las capas con transversales cada cierta distancia, lo que permite el abandono de las galerías en capa según se va llegando a un nuevo transversal (Jardón, 2008).

Estas dos fases de minería generaron un macizo muy "tronado", en el argot minero, lo que facilitaba la infiltración de agua, tanto a través del macizo rocoso como de las capas de carbón, exigiendo el mantenimiento de un intenso bombeo de desagüe que permitiese las labores de extracción.

Aunque la técnica minera permitió aumentar la diferencia de cotas entre las plantas de los pozos, la selección del yacimiento y su progresivo agotamiento han exigido sucesivas reprofundizaciones hasta llegar a alcanzar profundidades de 700 m por debajo del nivel del valle, lo que en algunas zonas significa llegar hasta la cota -400 m s.n.m., que hasta el afloramiento en superficie, por encima de la cota 600 m s.n.m., deja un macizo afectado de hasta unos 1000 m.



Figura 8. Esquema de labores mineras de extracción de carbón en la CCC

En la primera fase de minería de montaña, el transversal general más bajo es la referencia del nivel base de drenaje, de modo que el macizo entre la superficie y las galerías se va drenando, tanto más cuanto mayor sea el progreso de la labor, provocando un lento y paulatino retroceso de la superficie piezométrica inicial hacia los frentes de avance, a medida que se incrementa el espacio ocupado por las labores.

En condiciones óptimas (suficientes) de permeabilidad, los frentes de avance señalan puntos de la superficie piezométrica, quedando por tanto, las labores en su dominio litológico seco y con aportación de agua subterránea solamente en la zona del frente, aunque en la realidad de este caso, por estar estas labores desarrolladas dentro de tramos litológicos con permeabilidad muy baja, debe considerarse como situación normal un retroceso de la superficie piezométrica intermedia entre la inicial y aquella coincidente con los frentes de avance.

Además, parte de las labores mineras recibirán un aporte de agua por filtración variable en función de la permeabilidad del terreno atravesado y de la fisuración producida a techo de las capas por las convergencias de hastiales, mientras que por debajo de las labores mineras el macizo rocoso permanecerá saturado.

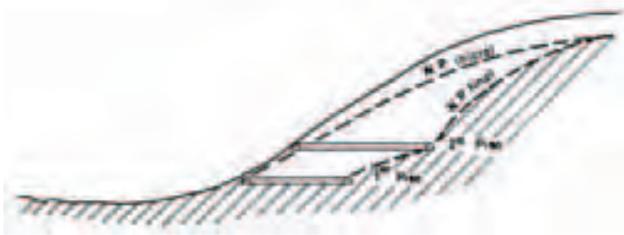


Figura 9. Esquema teórico del drenaje en una explotación de montaña (González y Rebollar, 1986)

La consecuencia principal producida por la minería de montaña es dejar un macizo muy “tronado” que facilita la infiltración tanto a través del macizo rocoso como de la capa de carbón (Pendás y Loredó, 2006).

Tras la minería de montaña, se inician en la CCC las explotaciones mediante pozos de los que parten una serie de galerías a distintos niveles, con lo que el nivel base de drenaje serán las nuevas galerías construidas, el cual se irá desplazando hacia la planta más profunda. Por tanto, a medida que van desarrollándose nuevas plantas, el drenaje se va desplazando progresivamente hacia la más baja hasta alcanzar finalmente un estado permanente en que el estrato permeable inmediatamente situado a techo de la planta más baja esté parcial o totalmente vaciado (según la permeabilidad del macizo rocoso afectado) y saturada la zona por debajo de la cota de dicha planta. El esquema de este funcionamiento se representa en la Figura 10, aunque las posiciones sucesivas de los niveles piezométricos son aproximaciones, lo mismo que suponer un vacío total, ya que en un medio fisurado son normales filtraciones intermedias entre el nivel de recarga y el nivel de base, puesto que las fracturas constituyen una vía preferente de circulación (González y Rebollar, 1986).

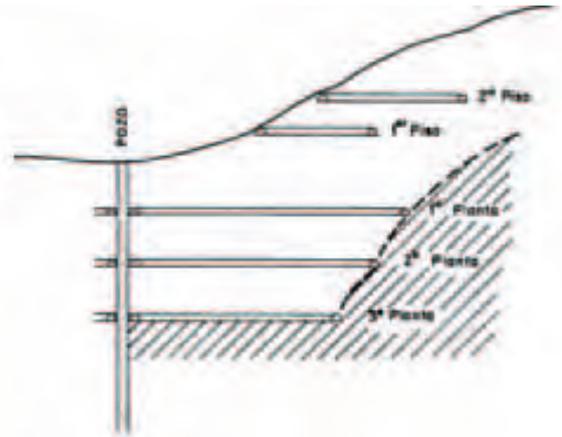


Figura 10. Esquema teórico del drenaje de un pozo minero (González y Rebollar, 1986)

Como se observa en la Figura 6, las explotaciones mineras están separadas de los grandes sistemas acuíferos por tramos litológicos impermeables o muy poco permeables con el suficiente espesor para que las labores mineras no lleguen a interferir directamente con ellos, permaneciendo inalterados y manteniendo, por tanto, su funcionamiento hidráulico natural. Los únicos “acuíferos” afectados son los formados por los materiales a techo y muro de las capas de carbón.

El hecho de la baja o muy baja permeabilidad de estos materiales, hace que la entrada directa del agua de lluvia a su encajadura sea el mecanismo fundamental de suministro hídrico al interior de las explotaciones, de forma más acusada sobre todo en aquellas en las que el macizo de protección con la minería de montaña sea inexistente o ineficaz, y, lógicamente, deberá producirse a través de los espacios libres (huecos) de estas labores que alcanzan la superficie topográfica, así como las fracturas que la comunican con tales labores, permitiendo, así, el acceso del agua meteórica.

Esta incidencia minera se puede comprobar comparando las curvas correspondientes a los caudales totales anuales bombeados en un pozo frente a la curva de los volúmenes acumulados de los huecos mineros a medida que se avanzaba en las labores. En las proximidades a la zona de estudio únicamente se disponía de valores diarios de los caudales bombeados para los pozos Entrego y San Mamés, de cuyo estudio se deduce que existe una total independencia entre el desagüe y la ampliación de las labores mineras, o lo que es lo mismo, de huecos de drenaje. La entrada de agua de lluvia, dependiente de la superficie de infiltración e independiente del avance de las labores, predomina sobre los aportes de la descarga de acuíferos interceptados por dichas labores, por lo que se puede decir que el acuífero multicapa de areniscas, que inicialmente podía ser considerado de tipo poroso intergranular, pasa a ser de tipo kárstico-poroso, ya que su permeabilidad se debe no sólo a porosidad primaria, sino también a la secundaria, debida fundamentalmente a grietas, fisuras y huecos (Arquer et al., 2006). Hay que tener en cuenta que

las areniscas y las pizarras, al ser materiales más duros que las capas de carbón, se comportan de una manera más rígida ante los esfuerzos causados por la explotación, mientras que las capas de carbón tendrán mayor plasticidad ante los mismos esfuerzos. Este hecho hace que la fracturación afecte más a las pizarras y a las areniscas, favoreciendo la infiltración y la circulación del agua a su través.

Efectivamente, los valores de la porosidad, transmisividad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento de estos materiales aumentan notablemente respecto a sus valores iniciales. En el caso de las areniscas estos valores podrían variar según lo expresado en la tabla 1.

De manera complementaria, con los datos de precipitaciones recogidos en la estación meteorológica de Pola de Laviana, se llevó a cabo una correlación entre los datos de pluviometría y los volúmenes de desagüe de los pozos Entrego y San Mamés, en la que se aprecia una relación que permite deducir una respuesta relativamente rápida a la lluvia en los volúmenes de agua bombeados en ambas explotaciones, lo que asemejaría este modelo de “acuífero” a uno de tipo kárstico (Arquer et al., 2006).

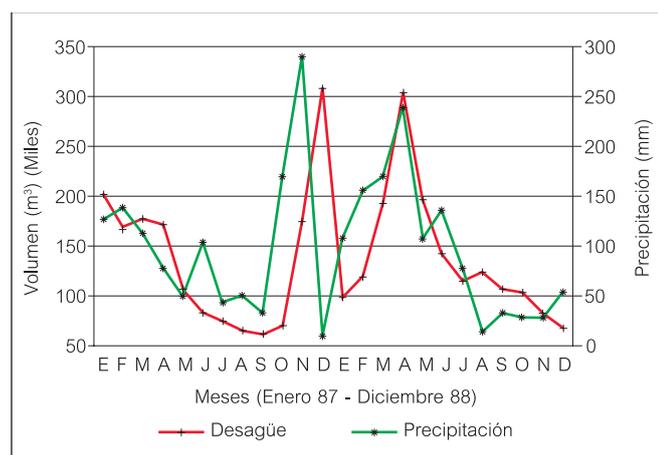


Figura 11. Pluviometría-desagüe en el Pozo San Mamés

En resumen, donde antes había pequeños acuíferos en arenisca de un sistema multicapa de pequeña entidad (Pendás et al., 2002), con la explotación se ha producido por una parte, un hueco como consecuencia de la extracción del carbón, y por otra, la fracturación del macizo dando lugar a un nuevo “acuífero” con una triple porosidad similar a la de los acuíferos carbonatados kársticos (galerías y capas explotadas, porosidad por fractura -macizo rocoso- y porosidad de la matriz -roca y carbón-) (Pendás y Loredó, 2006).

2.2.6 Descripción y situación de los trabajos mineros

Basandonos en las descripciones realizadas en el Estudio sobre la Inundación de los Pozos Mineros en la Zona Barredo- Valle del Turón – Valle del Aller realizada por el Grupo HUNOSA en colaboración con la Universidad de Oviedo y con el IGME (Convenio HUNOSA, 2008), podemos dividir la zona de estudio en dos sectores en función de las labores mineras existentes, así

tendremos: el valle del río Caudal (zona de Barredo), sector en el que se ubica el Pozo Barredo y el valle del río Turón, donde encontramos los Pozos Figaredo, San José y Santa Bárbara. Complementariamente se hace una breve descripción de las labores mineras ubicadas en el valle del río Aller, donde se localizan los Pozos Santiago, San Jorge y San Antonio, siendo el pozo Santiago la única labor minera que permanece activa en la actualidad próxima a la zona de estudio, debido a que estas labores pueden ejercer cierta influencia durante la inundación de los pozos de la zona de estudio, ya que aunque no ha podido ser demostrado, se cree que el Pozo Santiago está conectado con el Pozo San José, ubicado este en la zona de estudio. Existen también otra serie de conexiones de estos pozos con otros de menor entidad (pozos auxiliares o pozos-plano), que no se describirán por su escasa repercusión para este estudio. Dada la proximidad de los pozos a núcleos de población de la cuenca, se podría aplicar la metodología de estudio a todo el conjunto de los pozos, pero se ceñirá el estudio a una aplicación práctica al pozo Barredo y al pozo Figaredo (por estar sus labores conectadas), dada su proximidad al Campus de Mieres, donde están en fase de construcción varios edificios de investigación, docencia y deportivos, y al futuro Hospital Comarcal de Mieres.

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 13).

Además de los pozos mencionados o “minería de valle”, la zona de estudio también se vio afectada por la Minería de Montaña, que marcó el comienzo de la actividad minera en la CCC de Asturias. Así fueron numerosas las capas explotadas tanto por las empresas importantes de la época como por pequeñas explotaciones privadas, lo que hace 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.

2.2.6.1 Actividades mineras en el valle del río Caudal – zona de Barredo

Minería de montaña

La minería de Montaña en este sector queda representada por la Mina Mariana, que forma parte del grupo Coruxas-Mariana, con una estructura que incluye hasta 15 pisos, situada sobre la ladera occidental del “macizo Polio”. El carbón de los diferentes pisos era transportado por el exterior mediante planos inclinados, llegando el inferior de ellos desde el exterior del 1^{er} piso de Mariana hasta Barredo. Está unida desde tercera planta por un plano con el Pozo Barredo.

Porosidad (%)		Coeficiente de Almacenamiento		Permeabilidad (m/día)		Transmisividad (m ² /día)	
Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
1	>10	10 ⁻³ -10 ⁻⁴	10 ⁻¹	10 ⁻¹	100	10	1000

Tabla 1. Variación de los valores hidráulicos del acuífero por la acción de las labores mineras



Figura 12. Mapa de situación de los pozos mineros

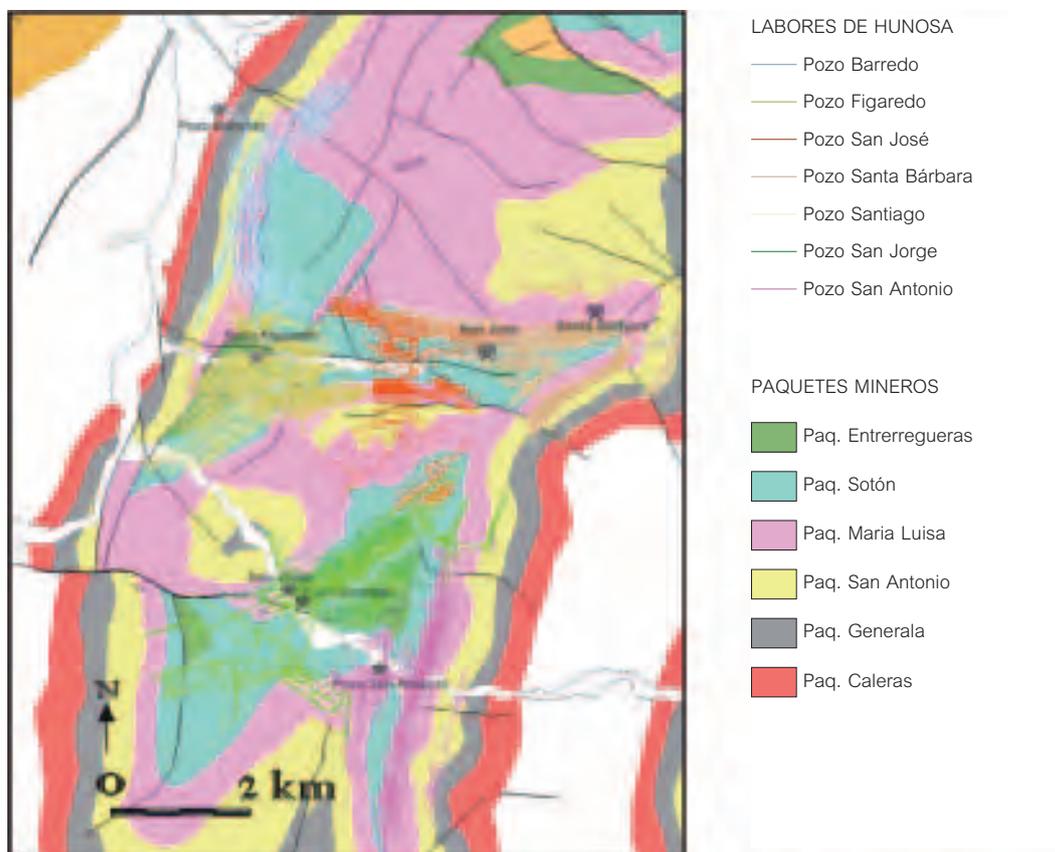


Figura 13. Esquema de labores en planta y estructura de la CCC

Minería de valle

Dentro de la minería de valle, en el sector noroccidental del área de estudio, dentro del núcleo urbano de Mieres, se sitúa el **Pozo Barredo** (coordenadas U.T.M. $x=274.848$, $y=4.791.676$) en la margen derecha del río Caudal. Su actividad extractiva comenzó en el año 1926 y finalizó en el año 1993. No obstante, en el pozo se continuaron realizando labores de desagüe debido a la comunicación interior de esta labor minera con el Pozo Figaredo, por una parte, y a su utilización parcial como Centro de Experimentación Subterránea de la Fundación Barredo (Consejería de Industria y Empleo del Gobierno del Principado de Asturias), hasta que en el mes de diciembre de 2007 dio comienzo el proceso de inundación.



Figura 14. Vista del Pozo Barredo

El Pozo Barredo explotó principalmente el flanco occidental, tumbado, del Sinclinal de Barredo, que continúa al sur hacia Figaredo, cortado por la Falla de Barredo, falla inversa, paralela y coincidente con el eje del sinclinal, que eleva el flanco oeste sobre el este. Los paquetes explotados en el Pozo Barredo son María Luisa, San Antonio, Generalas y Caleras. Las fuentes utilizadas han sido los Inventarios de Carbón de 1977 y su actualización de 1984, así como los datos facilitados por la propia HUNOSA.

- Zona Norte, Flanco Este.

Explotó las siguientes capas del paquete María Luisa: 10, 12, 13, 14, Carbonero y 17, de las que las de mayor potencia eran la 10ª (1,40m) y la 17ª (2,00m). La pendiente media es de 45°-50° y no se reconoció el paquete a techo de la capa 10ª.

- Zona Sur, Flanco Oeste.

Explotó las siguientes capas:

- Del paquete María Luisa: Carbonero, Tercera y Recorte.
- Del paquete San Antonio: Requentina, Isabela y Carbonero.
- Del paquete Generalas: Carbonero.
- Del paquete Caleras: Juan Carro.

La pendiente media es de 70°, siendo la distancia entre paquetes mineros de 210 m entre Caleras y Generalas, 119 m entre Generalas y San Antonio y 96 m entre San

Antonio y María Luisa, que sólo se reconoció en su parte inferior. La capa más explotada fue la Tercera, que llegó a explotarse hasta los años 70, con una potencia de 2,50 m, por el método de cámaras y pilares. Con rozadora y una potencia de 1,50 m se explotó hasta su cierre.

- Zona Sur, Flanco Este.

Explotó exclusivamente el paquete María Luisa. Es ésta el ala tumbada del Sinclinal de Barredo, con un buzamiento de 45° en las inmediaciones del Transversal General y tumbándose hasta unos 35° según se avanza hacia el Sur en dirección a las concesiones de la antigua Minas Figaredo S.A., teniendo todas las capas continuidad por el Pozo Figaredo y obligando, en su día, a dejar macizos de protección.

Se explotaron las siguientes capas: Carbonero, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 y 17, de las que la de mayor potencia era la 17, superior a 2 m.

En el año de su cierre se explotaban aún la Novena muro (1,15m), Décima techo (0,7m), Décima muro (1,9m), Doce (1,2m) y Diecisiete (2,4m).

Aunque la zona fue explotada prácticamente en su totalidad por las labores del Pozo Barredo hasta la cota de su 5ª Planta (-135,5 m.s.n.m.), tras la incorporación de Minas Figaredo a HUNOSA se inició la explotación, en cotas inferiores a 5ª Planta de ambas explotaciones, por las labores del sector Norte de Figaredo.

Como se puede ver en la Figura 16, este pozo consta de cinco plantas principales. Su brocal se sitúa a + 220 m s.n.m., siendo éste el brocal más bajo de los pozos conectados con él, y que pertenecen a la zona de estudio. La profundidad total de la caña del pozo es de 362 m, estando la zona de embarque en la 5ª planta, situada a una cota de 142 m por debajo del nivel del mar. Está conectado con el Pozo Figaredo.



Figura 15. Esquema en planta de las labores del Pozo Barredo

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, al que se incorpora asimismo un vertido procedente de l/s en los últimos años (2002 a 2007), siendo el caudal medio de bombeo durante el 2007 de 34 l/s.

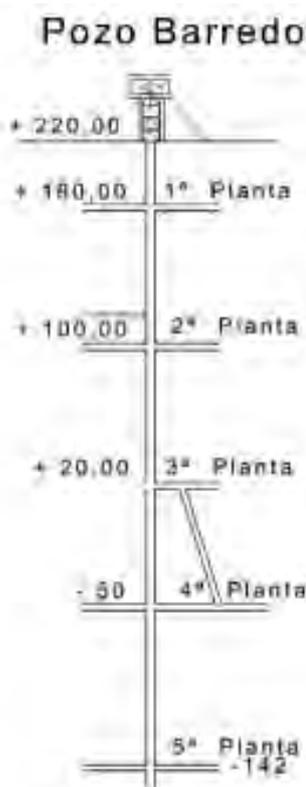


Figura 16. Esquema de las labores en perfil del Pozo Barredo

2.2.6.2 Actividades mineras en el valle del río Turón

Minería de montaña

Algunos de los grupos de montaña situados en el valle del Turón, explotados por varias empresas mineras, tales como Hulleras del Turón, Fábrica de Mieres y Ortiz Sobrinos, son los denominados Corujas, Escribana, Santo Tomás, San Víctor, Espinos, etc.

Situadas en la parte más occidental de valle, relacionadas con el Pozo Figaredo y coincidiendo su representación en planta con parte de las labores de minería de montaña del grupo Coruxas-Mariana, se encuentran las labores mineras de montaña del grupo Santo Tomás (cotas 281 y 398 m s.n.m.), Clavelina (desde Piedrafitá hasta La Mortera), Piedrafitá (en el medio) y Riquela, entre otras.

Hacia la zona central del valle existen numerosas minas de montaña relacionadas con los pozos San José y Santa Bárbara, como es el caso de los siguientes grupos: San Vicente (al sur del pico Polio), Polio (al sur del pico Polio) y Carrizal ó San Víctor (ladera septentrional del pico Polio). Están situados ladera arriba del pozo San José. El 1^{er} piso del grupo San Víctor tiene una cota de 315 m s.n.m., el 10^o y último piso de San Víctor, que equivale al piso 0 del Grupo Polio, está a 638 m s.n.m. y el 2^o piso de Carrizal-San Víctor a 700 m s.n.m. Estos grupos fueron parcialmente reconvertidos a cielo abierto, pero aún se conserva parte de la minería antigua de montaña. El Grupo Espinos se sitúa en la zona central del valle, estando su 1^{er} piso a cota 352 m s.n.m. En cuanto a los grupos San

José y San Benigno, se sitúan en la ladera sur del pozo San José; entre el 1^{er} piso de San José (293 m s.n.m.) y el 2^o piso (360 m s.n.m.) se intercala el 2^o piso de San Benigno (347 m s.n.m.).

También existen los grupos San Pedro y afines (Rabaldana y Los Corrales); el 1er piso de San Pedro está a una cota de 311 m s.n.m. Y ya en el cierre oriental del Sinclinal de Turón se encuentran los grupos Podrizos y Fortuna. El Pozo Fortuna se abre a la cota del 1er piso de montaña (381 m s.n.m.), estando profundizado hasta 5^a planta (191 m s.n.m.), que equivale a la 3^a planta del Pozo Santa Bárbara. Finalmente, en la zona más oriental del valle, y correspondiendo con la estructura del Sinclinal de San Fernando, existe una serie de minas de montaña que no tienen relación directa con ninguno de los pozos principales del valle, como son, el Grupo Urbiés (su 1er piso está a 567 m s.n.m. de cota), el Grupo Miravalles y el Grupo Piñeres (1er piso a 365 m s.n.m.), entre otros.

Minería de valle

Dentro del valle del río Turón, la explotación de los yacimientos de carbón por minería de valle tuvo como principales exponentes a los pozos Figaredo, San José y Santa Bárbara.

El **Pozo Figaredo** (coordenadas U.T.M. $x=275.407$, $y=4.788.068$), situado al sur del Pozo Barredo, en el tramo final del río Turón (localidad de Cortina, término municipal de Mieres) antes de su desembocadura en el río Caudal, está formado por dos cañas de pozo vertical: la correspondiente al denominado Pozo San Vicente y la del Pozo San Inocencio. En el año 2007 se puso fin a las labores de extracción de carbón, aunque durante unos meses se continuaron los trabajos de bombeo para seguir con el desagüe de las labores mineras hasta el mes de diciembre de 2007, a partir de cuya fecha se dio comienzo al proceso de inundación de dichas labores. El Pozo San Vicente, cuyo brocal está a cota 279 m s.n.m., tiene una profundidad máxima de 524 m, hasta llegar a cota de 245 bajo el nivel del mar, que se corresponde con la 11^a planta. El Pozo San Inocencio, con brocal a cota 254 m s.n.m., tiene una profundidad máxima de 599 m, hasta llegar a cota de 345 bajo el nivel del mar, que corresponde a 9^a planta. Ambas explotaciones constituyen una unidad debido a las numerosas conexiones existentes entre ellas (Figura 18). Además, este pozo se encuentra conectado con el Pozo Barredo hacia el norte y con el Pozo San José hacia el este. El Pozo Figaredo explotó las capas de carbón emplazadas en el sector occidental del Sinclinal de Turón, estructura cilíndrica ligeramente asimétrica de dirección E-O, situado entre los anticlinales de Polio, al norte, y Revallinas, al sur (Figura 19). Los paquetes explotados en el Pozo Figaredo son Sotón y María Luisa. En los últimos años (2002-2007), se bombeó una media de 86 l/s, siendo el caudal medio de bombeo durante 2007 de 71 l/s. El agua bombeada salía por tres tuberías independientes desde 3^a, 5^a y 7^a planta y se vertía directamente al río Turón.

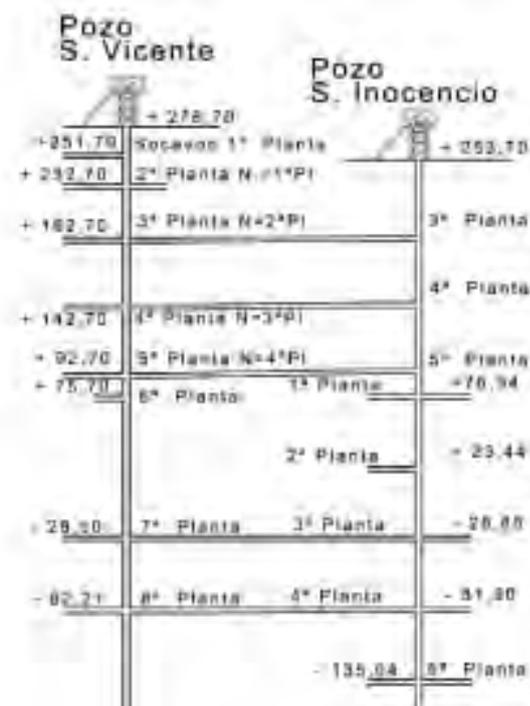


Figura 17. Vista del Pozo Figaredo

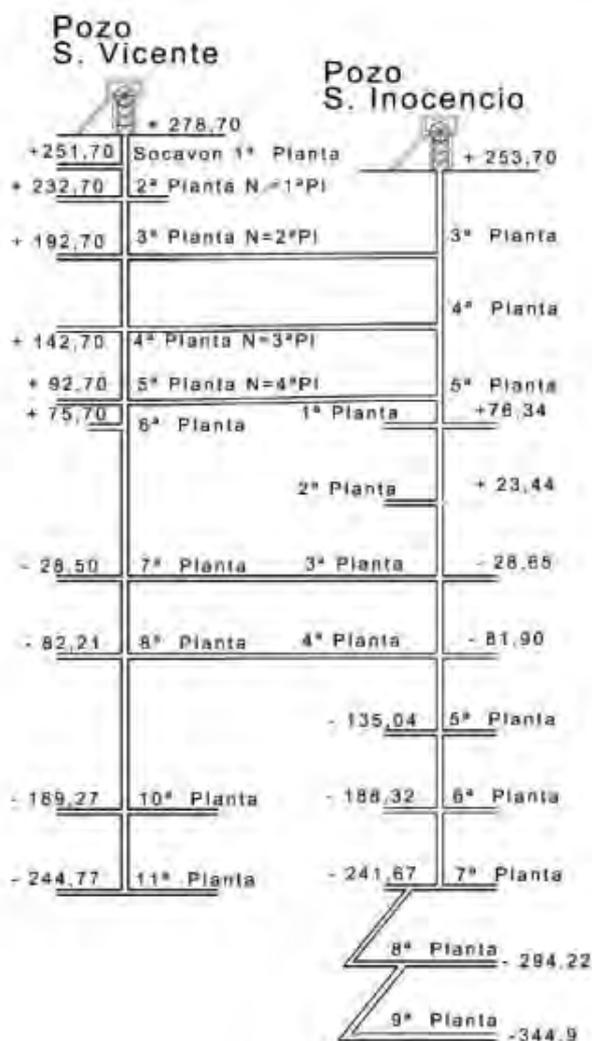


Figura 18. Esquema de las labores en perfil del Pozo Figaredo

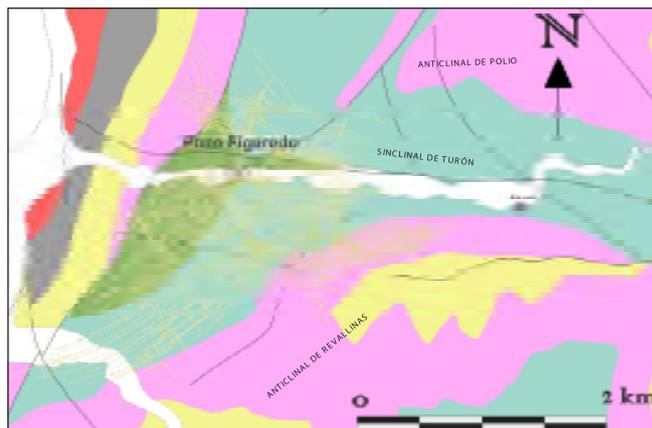


Figura 19. Esquema de las labores en planta del Pozo Figaredo

En función de la estructura geológica descrita se ha dividido el yacimiento en varios campos de explotación que llegaron a tener cierta complejidad, más aún cuando la antigua empresa propietaria dividía además su yacimiento en función de las distintas cotas de cada pozo. Todavía en la cubicación del año 2001 se dividió el yacimiento en los siguientes campos: Norte Derecha, Norte Izquierda, Sur Izquierda, Sur Derecha y Derecha Sur. Las fuentes utilizadas han sido ENADIMSA (trabajos de 1977 y 1983) y los datos facilitados por HUNOSA.

- El Norte Izquierda, explotó la continuación del ala tumada del paquete María Luisa y, a partir de 1993 y en cotas inferiores a 5ª Planta, siguió explotando las capas de dicho paquete que explotaba Barredo en su Zona Sur, Flanco Este. En pisos altos se explotó el paquete Sotón, principalmente las capas 8 (somera-mente por S. Vicente), 10, 14 (S. Inocencio) y 17, siendo las más importantes la 8, 10 y 17.
- El Norte Derecha y Sur Izquierda explotaron los paquetes Sotón, y María Luisa.
- El Sur Derecha explotó el paquete Sotón y, desde el Pozo San Inocencio, las capas 23, 27, 30 y Carbonero del paquete María Luisa, equivalentes, según correlación con la denominación de Barredo, las 23 y 30 de Figaredo a las Décima Techo y 12 de Barredo. Con estas últimas capas, y a partir del año 1994, explotó por debajo de Santa Cruz de Mieres entre Grillero y Sovilla.

Situado más al este del anterior, aguas arriba del río Turón y en su margen izquierda, el **Pozo San José** (coordenadas U.T.M. $x=277.671$, $y=4.787.761$) fue proyectado en el año 1952, finalizando su actividad extractiva en el año 1993 y continuando las labores de mantenimiento en lo referente al desagüe de la estructura minera, operaciones que finalizaron en el mes de junio de 2008, fecha en la que dio inicio el proceso de inundación. Su brocal se sitúa a cota + 294 m s.n.m., estando formado por 8 plantas, aunque permanecía inundado hasta 6ª planta desde su cierre. La cota de 8ª planta era de -105 m s.n.m., con una profundidad total de la caña del pozo de 399 m. Conecta por el oeste con el Pozo Figaredo, por el este con el Pozo Santa Bárbara y hacia el sur con el Pozo Santiago. El Pozo San José explotó principalmente la zona central

del Sinclinal de Turón, el Anticlinal de Revallinas y el Sinclinal de Moreda en su zona norte. Los paquetes explotados son Sotón, María Luisa, San Antonio y Generalas. En este pozo, en los últimos años (2002-2007), se bombeó un caudal medio de 118 l/s, siendo el bombeo medio durante el año 2007 de 102 l/s. El bombeo se realizaba desde una sala de bombas instalada en 6ª planta, que impulsaba el agua a través de tubería hasta el río Turón, con la salida a la altura del castillete.



Figura 20. Vista del Pozo San José

El **Pozo Santa Bárbara** (coordenadas U.T.M. x=279.334, y=4.788.364), situado en La Rabaldana, se encuentra ubicado al este del anterior, aguas arriba del río Turón y en su margen izquierda. Esta instalación minera, conocida localmente también como La Rabaldana, Grupo Turón o Grupo Santa Bárbara, se explotó hasta el año 1994, fecha en la que cesaron las labores extractivas. Consta de dos pozos, uno maestro y otro para el retorno de ventilación, muy próximos; el primero profundiza hasta 8ª planta (-98 m s.n.m.) y el segundo hasta 11ª planta (-209 m s.n.m.). Su brocal se sitúa a cota + 335 m s.n.m. Además consta de un pozo plano denominado Fortuna, que realiza el papel de pozo auxiliar. El Pozo Santa Bárbara explotó las capas situadas en la zona oriental del Sinclinal de Turón. Los paquetes explotados son Sotón, María Luisa, San Antonio y Generalas. En este pozo se bombeó una media de 27 l/s en los últimos años, siendo el bombeo medio durante el año 2007 de 12 l/s. El agua bombeada se drenaba al río Turón a través de una tubería situada a la altura del castillete. A partir de 1996 se suspende el bombeo debido a que se independiza de las conexiones con el Pozo San José a través de una serie

de "tapes". A partir del año 2001 cesa el proceso de inundación debido a un incremento del caudal de bombeo en el Pozo San José, reanudándose este proceso en agosto de 2008. En diciembre de 2007, el nivel piezométrico medido desde la caña del pozo estaba situado a 260,2 m de profundidad (el nivel piezométrico estaba a + 74,6 m s.n.m.).



Figura 21. Vista del Pozo Santa Bárbara

2.2.6.3 Actividades mineras en el valle del río Aller

A pesar de que el sector del valle Aller no entraría dentro de la zona de estudio, se mencionan en este apartado sus principales labores mineras, dada la conexión entre pozos de ambos sectores, lo que puede influir en el proceso de inundación de los mismos.

Minería de montaña

A cotas de minería de montaña, la explotación del carbón en el valle del Aller ha sido desarrollada por un gran número de grupos mineros, algunos de los cuales son: Mina Mariana, Cutriferá, Felguerúa, Dos Amigos, Catalana, Pomar, Conveniencia, Desquite y Pontones.

En la parte inferior del valle del Aller, zona más occidental, se encuentra el pozo plano de Vanguardia y sus grupos (Vanguardia y Dos Amigos), los cuales no presentan ninguna conexión directa con las principales labores de pozo vertical.

En relación con los pozos San Jorge y Santiago, la minería de montaña correspondiente está representada por los grupos Conveniencia y Legalidad, situados al norte

del valle, sin estar representados en los mapas sus labores, y los relacionados con la Mina Marianas, que son los grupos Tarancón, Melendreras y Bóo.

Relacionados con el Pozo San Antonio, existen los grupos de montaña Santo Tomás-Moreda, Cutriferá, y las minas de la mitad sur del Sinclinal de Moreda, no reconocidas en profundidad, Canales, Pontones, así como otras labores como son San Luis y San Miguel, Campomanes, Felguerúa, Mogote, Campueta y Leoncia. Existen también, relacionados con el Pozo San Antonio y situados al E del mismo, los grupos ubicados en la estructura del Anticlinal de Desquite (Desquite y La Ceposa).

Finalmente, en la zona más oriental del valle, y relacionado con al Sinclinal de San Fernando, se sitúa el Pozo San Fernando, con un conjunto de labores de montaña asociados.

Minería de valle

En el valle del río Aller la explotación de los yacimientos de carbón por minería de valle tuvo como principales exponentes a los pozos Santiago, San Jorge y San Antonio.

El **Pozo San Jorge** (coordenadas U.T.M. $x=275.852$, $y=4.784.609$), fue inaugurado en el año 1942, continuando su actividad extractiva desde esa fecha hasta el año 1995. Actualmente forma parte del denominado Pozo Aller como auxiliar del Pozo Santiago y conectado con éste por labores de interior.

El **Pozo Santiago** comenzó su actividad en el año 1951, beneficiándose de los mismos paquetes mineros que el anterior pero a distintas profundidades de explotación. En la actualidad se siguen desarrollando las labores de explotación minera de este yacimiento, siendo el único centro que aún permanece activo en el valle del Aller. Este pozo, situado en la margen derecha del río Aller, en la localidad de Caborana (coordenadas U.T.M. $x=276.029$, $y=4.784.448$) tiene una profundidad de caña de 532 m.

Por último, el **Pozo San Antonio** (coordenadas U.T.M. $x=277.162$, $y=4.783.406$) desarrolló su actividad minera entre los años 1947 y 2003, y se sitúa en la margen izquierda del río Aller, en la población de Moreda. No obstante, y debido a la conexión por labores de interior con los anteriormente citados, se mantienen las labores de desagüe a través de los correspondientes equipos de bombeo. Su brocal se encuentra a cota + 302 m s.n.m., consta de 7 plantas y la profundidad de su caña es de 547 m. Los pozos del Aller explotan las capas de carbón presentes en el Sinclinal de Moreda, el Sinclinal de La Coberteria y el Anticlinal de Desquite. Los paquetes mineros explotados en los pozos del Aller son Sotón, María Luisa, San Antonio y Generalas.

En el conjunto de los pozos Santiago, San Jorge y San Antonio se ha bombeado una media de 172 L/s en los últimos años, siendo el bombeo durante el 2007 de 166 L/s y durante el 2008 de 178 L/s. El agua bombeada desde cada pozo se drena al río a través de tuberías.

2.2.6.4 Conexiones

Las conexiones principales abarcan a los pozos Barredo, Figaredo, San José, Santa Bárbara, Santiago, San Antonio y el auxiliar San Jorge, como se puede ver en las Figura 22 y Figura 23.

A continuación se hace una breve descripción de las principales conexiones entre los pozos principales situados en la zona de estudio

Entre los pozos Barredo y Figaredo la conexión principal es a través de galería entre 5ª planta pozo San Inocencio (-135 m.s.n.m.) y 5ª planta pozo Barredo (-142 m.s.n.m.). Entre las plantas 4ª (-50 m.s.n.m.) del pozo Barredo y 3ª (+29 m.s.n.m.) del pozo San Inocencio existe un cale por taller y entre las plantas 3ª (+20 m.s.n.m.) del pozo Barredo y 2ª (+23 m.s.n.m.) del pozo San Inocencio existe una posible conexión a través de macizo rocoso. En la Figura 22 se puede ver en planta la situación de la conexión principal a través de galería entre los pozos Barredo y Figaredo, donde se ve que la distancia entre el punto de conexión y las respectivas cañas de ambas explotaciones es de 3.300 m al pozo Barredo y de 1.050 m al pozo Figaredo.

Entre los pozos Figaredo y San José existe conexión a través de tres cales por taller entre: las plantas 7ª (-28 m.s.n.m.) del pozo San Vicente y 6ª (-15 m.s.n.m.) del pozo San José; las plantas 5ª (+93 m.s.n.m.) del pozo San Vicente y 4ª (+85 m.s.n.m.) del pozo San José y las plantas 3ª (+193 m.s.n.m.) del pozo San Vicente y 3ª (+135 m.s.n.m.) del pozo San José. Finalmente la conexión a través de cale por taller entre 1ª planta del pozo-plano Riquela en Figaredo (+207,2 m.s.n.m.) con 2ª planta del pozo San José (+185 m.s.n.m.) (Figura 22).

El pozo San José, además de su conexión por el oeste con Figaredo, tiene conexiones con Santa Bárbara por el este y Santiago por el sur. Con Santa Bárbara tiene dos posibles conexiones a través de macizo rocoso: 6ª planta (-15 m.s.n.m.) pozo San José con 7ª planta (-9 m.s.n.m.) pozo Santa Bárbara, esta conexión es muy dudosa y 4ª planta (+85 m.s.n.m.) pozo San José con 5ª planta (+89 m.s.n.m.) pozo Santa Bárbara y una tercera conexión por galería entre 3ª planta (+135 m.s.n.m.) pozo San José con 3ª planta (+139 m.s.n.m.) pozo Santa Bárbara. Con Santiago existe una posible conexión a través de macizo rocoso entre 3ª planta del Pozo San José (+135 m.s.n.m.) y 3ª planta del Pozo Santiago (+132 m.s.n.m.). En la Figura 23 se puede ver en perfil la situación de la conexión entre los pozos.

Dado que las labores en Figaredo y Barredo están conectadas, se realizará un estudio conjunto de ambos pozos, ya que la inundación en uno afectaría a las galerías del otro. En la Figura 25 se representa el plano de labores sobre el mapa geológico de superficie de la zona (realizado a partir de la Hoja 53 del MAGNA), y en la Figura 26 aparecen indicados los cortes B-B' y C-C', que corresponderían con el eje del sinclinal de Barredo, con su inclinación, y representando los límites de la cuenca hidrológica.

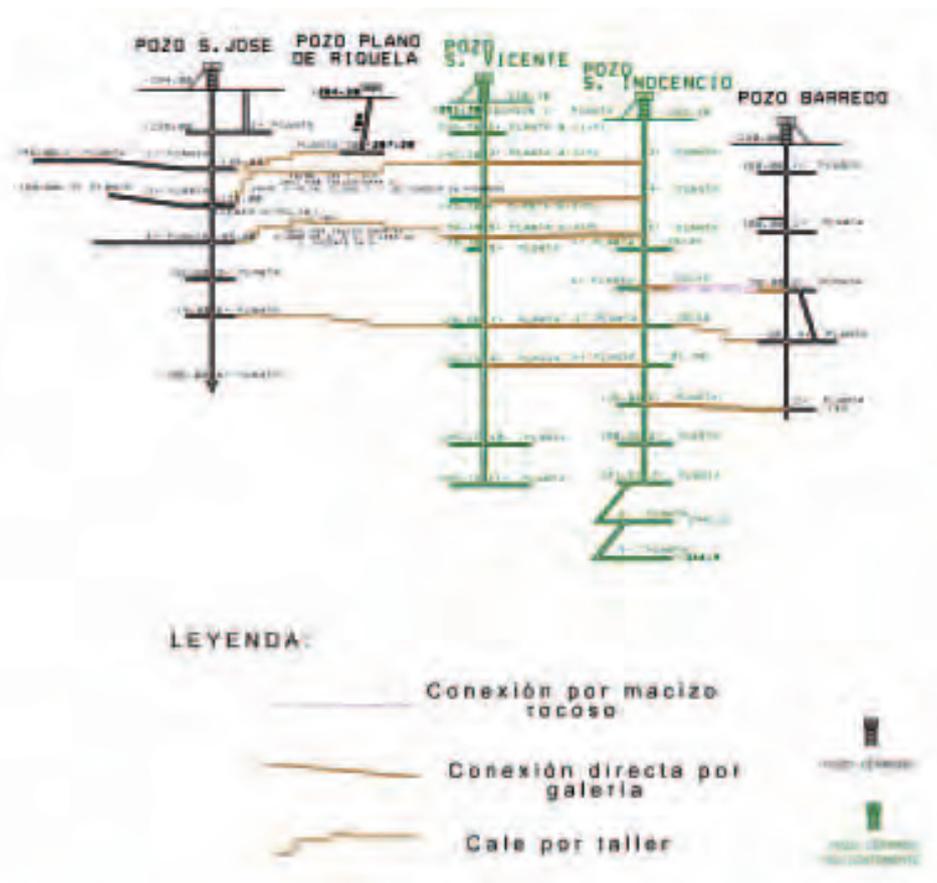


Figura 22. Conexiones entre los Pozos Barredo, Figaredo y San José

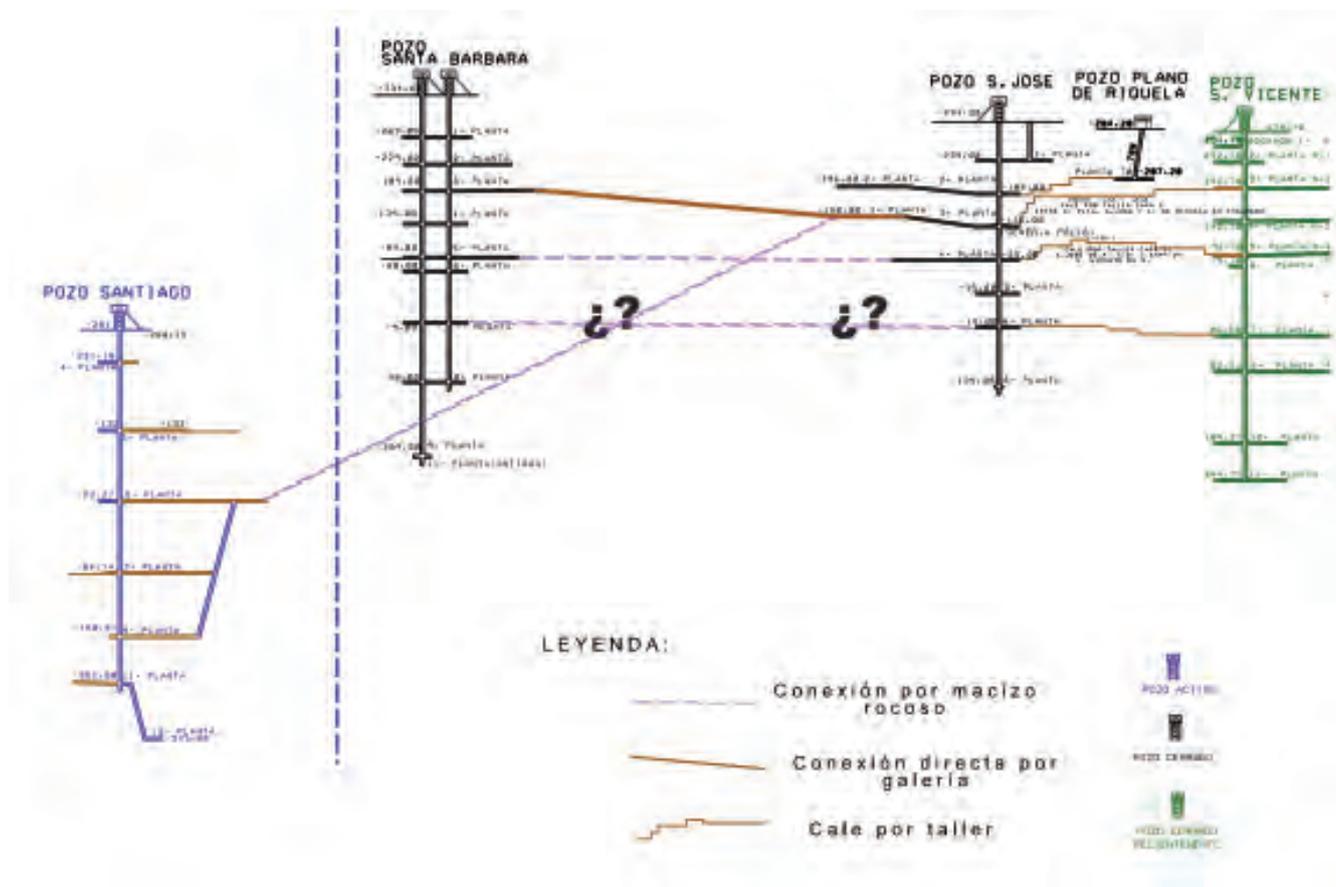


Figura 23. Conexiones entre los Pozos Santiago, Santa Bárbara y San José

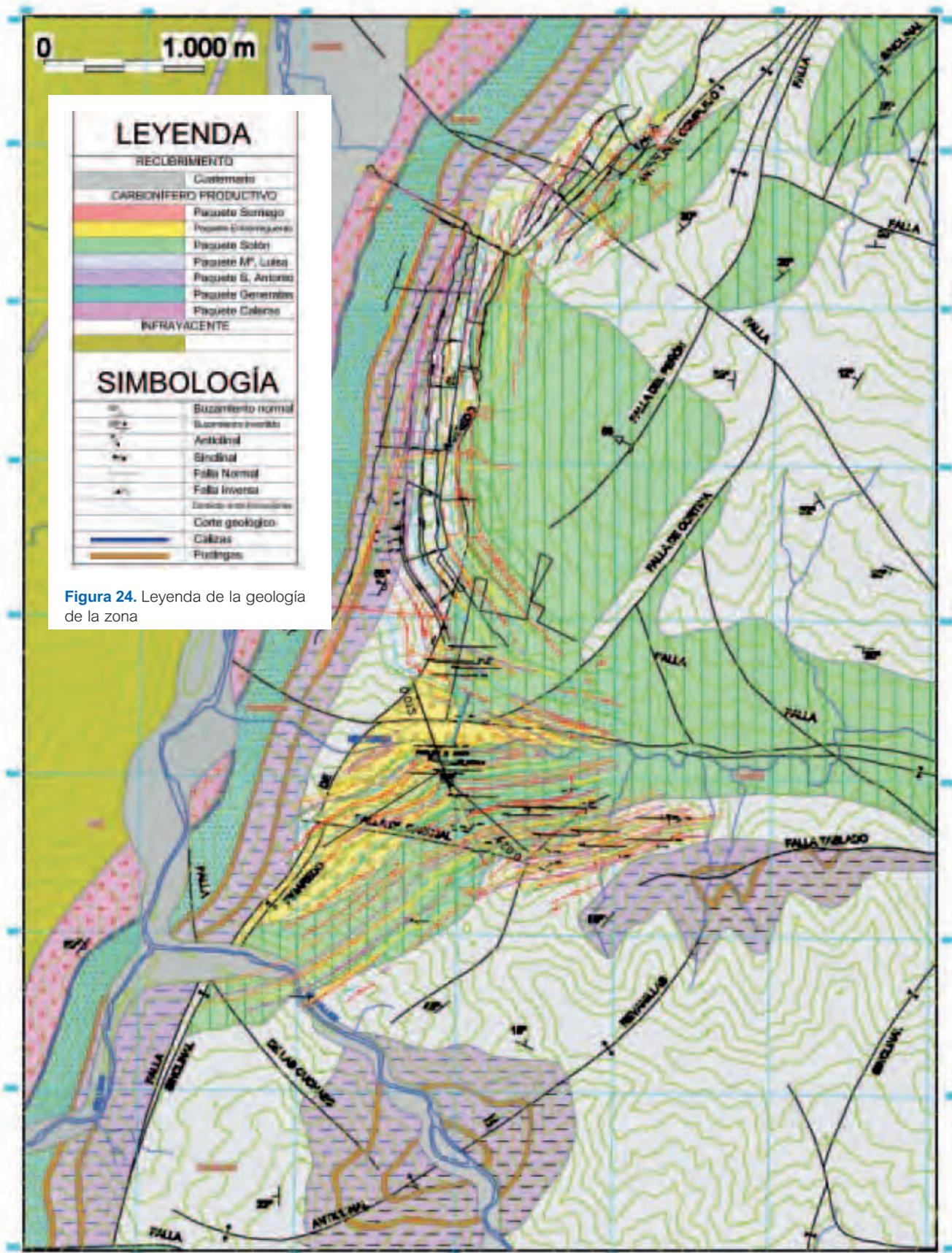


Figura 24. Leyenda de la geología de la zona

Figura 25. Planos de labores de los Pozos Barredo y Figaredo sobre el mapa geológico de superficie (Basado en IGME, 1984)

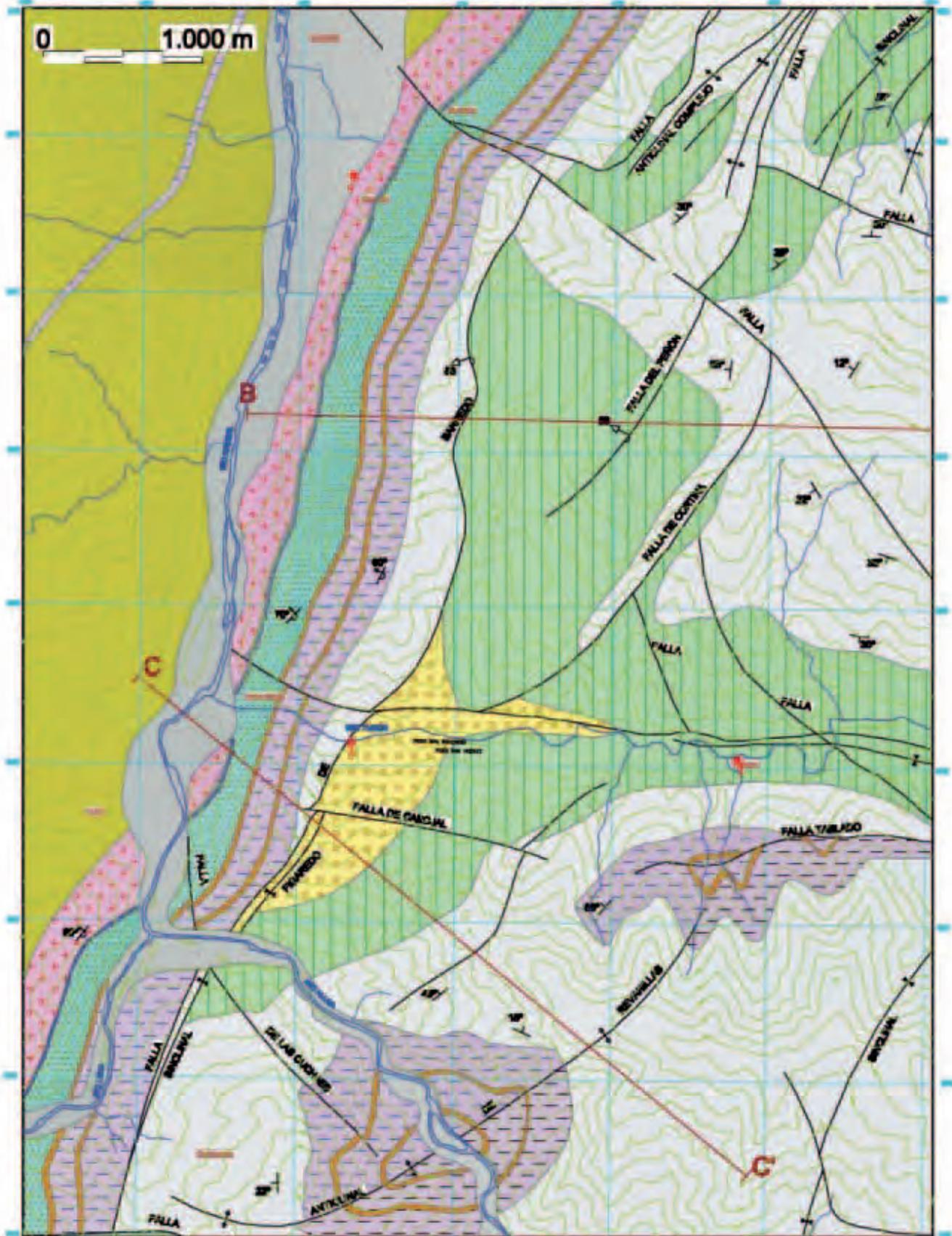


Figura 26. Cortes geológicos B-B' y C-C'

En las Figura 27 y Figura 28 se representan los cortes geológicos B-B' y C-C' del mapa anterior, según la *Actualización del Inventario de Recursos Nacionales de Carbón* (IGME, 1984). En estos cortes se señalan los límites de la cuenca hidrológica y se puede apreciar los flancos subvertical y tumbado del sinclinal de Barredo.

Finalmente, en la Figura 29 se representan las correlaciones entre las columnas estratigráficas de los pozos Barredo y Figaredo.

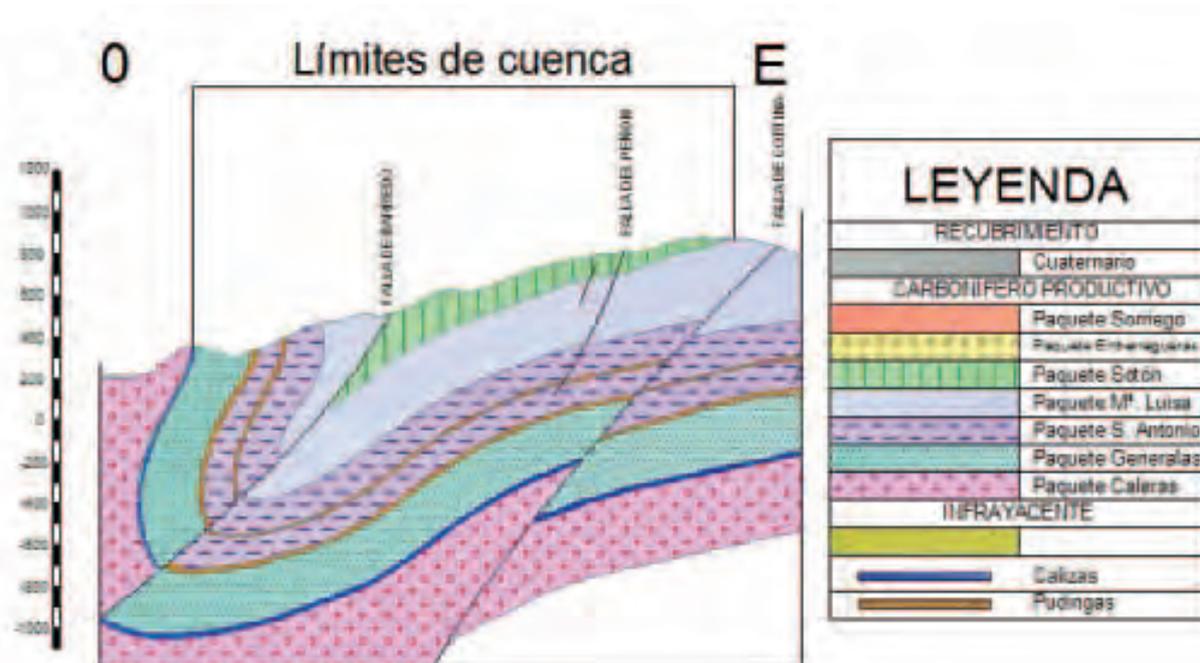


Figura 27. Corte B-B'

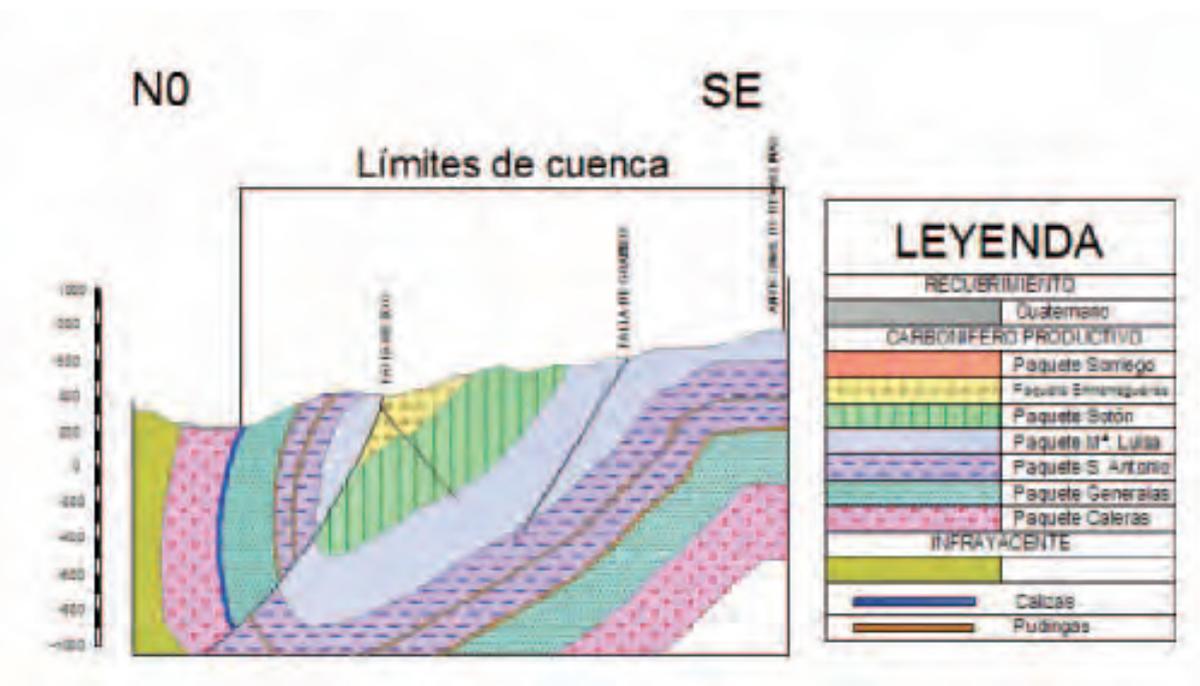


Figura 28. Corte C-C'

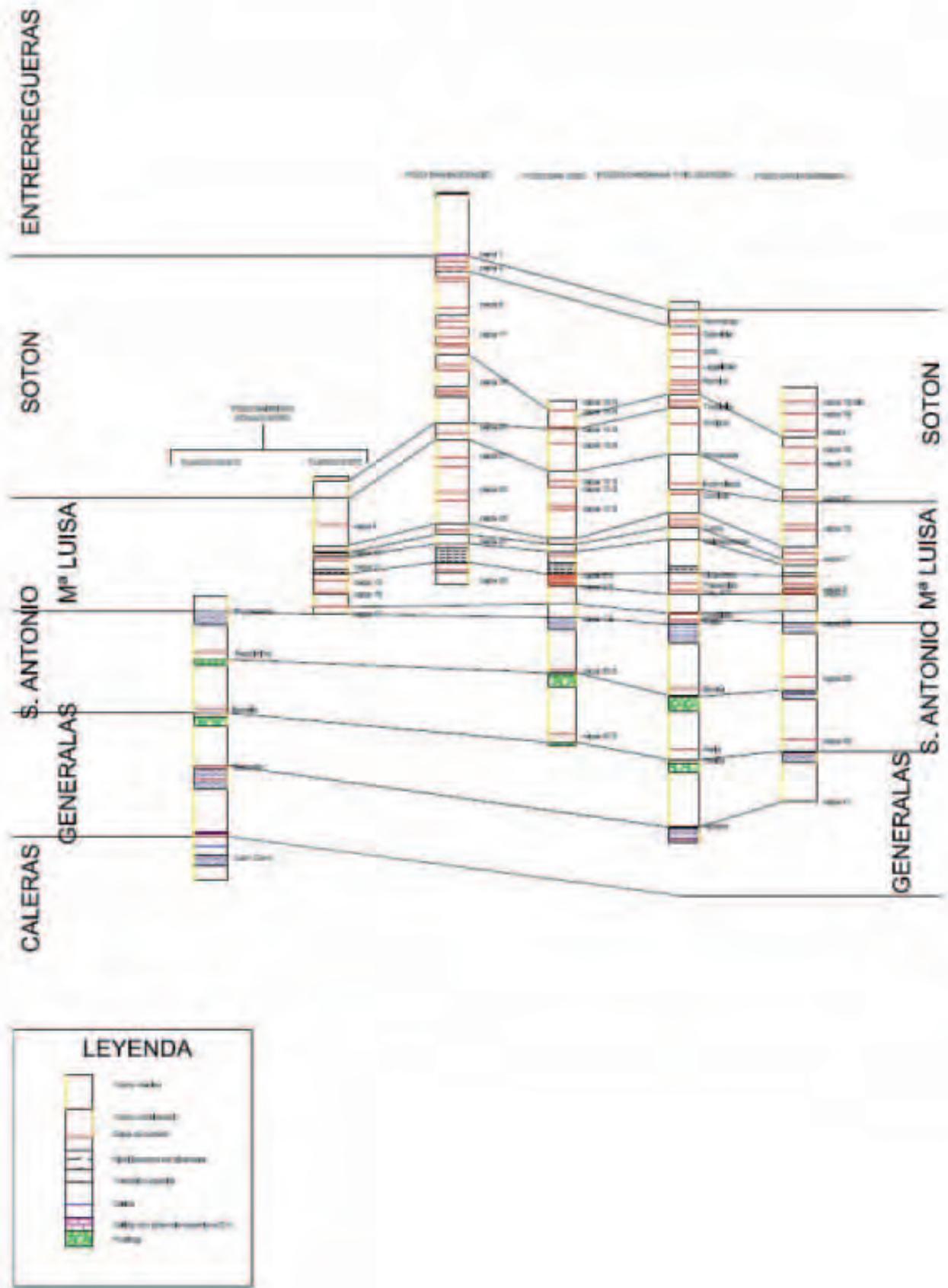


Figura 29. Correlación de las columnas estratigráficas de los pozos Barredo y Figaredo

3. OBJETIVOS

Como objetivos del presente proyecto se pueden considerar los siguientes:

- Recopilación y análisis de información, incluyendo una descripción geológica, estratigráfica y tectónica del entorno afectado, así como la descripción y situación de los trabajos mineros.
- Realización de un completo estudio climático e hidrológico en la zona de estudio, con el objeto de determinar, de la forma más fiable posible el balance hídrico de la cuenca en la que se ubican las labores mineras estudiadas.
- Realización de campañas de campo con el fin de obtener suficientes datos acerca de la calidad del agua superficial y subterránea (agua de mina), de cara a limitar o no sus posibles aplicaciones.
- Construcción de un modelo de huecos del embalse minero formado por las labores correspondientes a los pozos Barredo y Figaredo, con el fin de estimar el volumen de embalse subterráneo disponible a distintas profundidades y diseñar su óptima regulación.
- Realización de un estudio hidrogeológico en el que sean interpretados los datos de bombeo existentes, estimadas las características hidrogeológicas de las formaciones permeables existentes y analizado en detalle el rebote del nivel piezométrico (una vez interrumpido el bombeo en los pozos), hasta obtener un modelo hidrogeológico conceptual.
- Creación de un modelo de conductividades térmicas en el entorno del pozo Barredo.
- Análisis del aprovechamiento energético del agua de mina del embalse Barredo-Figaredo por medio de bomba de calor y mediante una central minihidráulica, así como comparación técnico-económica de las diferentes alternativas de aprovechamiento.

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1 Estudio climático

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 30 y el número de estaciones incluidas en la misma es de 48, tal y como se recoge en la Tabla 2.

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.



Figura 30. Área total considerada para la petición de datos climáticos al INM

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 2), quedando a 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 Figura 31 y la Tabla 3. Los datos facilitados fueron tratados y archivados en un idéntico formato para cada una de las estaciones.

	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 2200	LENA BOCA N. NEGRON	TP	153	05-49-57W	42-58-40	269027,014	4762326,437	1162	103	14	N
3	1 2220	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		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 2230	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	TABLADO 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 2370	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 2360	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	MUÑERA	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 2340	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

Tabla 2. Estaciones pluviométricas y termopluviométricas incluidas en el área seleccionada para la petición de datos climáticos. Estos no fueron facilitados en el caso de las estaciones sombreadas

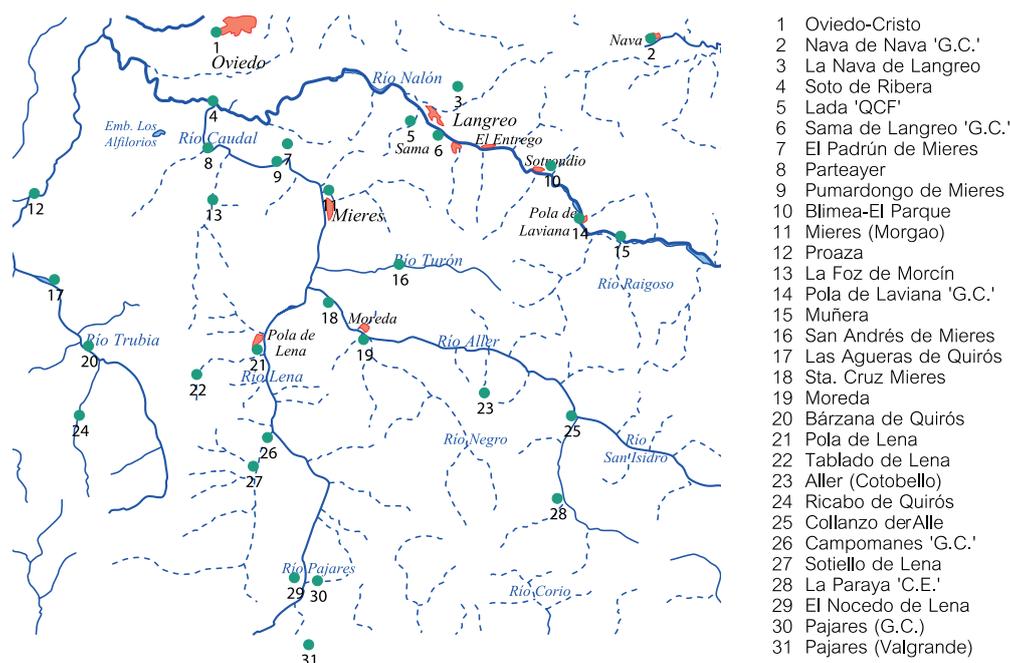


Figura 31. Estaciones consideradas en el estudio climático

	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 'QCF'	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	MUÑERA	TP	150	05-31-40W	43-14-08	294740,2	4790162,5	318	S	2001-2008
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	OVIEDO 'EL CRISTO'	CPE	173	05-52-24W	43-21-13	267130,4	4804181,1	336	S	1972-2008 (d)
19	1 221A	PAJARES 'G.C.'	P	153	05-46-22W	43-01-00	274039,9	4766482,9	1000	S	1971-2008
20	1 221D	PAJARES-VALGRANDE	A	153	05-46-42W	42-58-37	273441,2	4762086,3	1480	S	2000-2008
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	1971-2008
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	1969-2008
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	1979-2008(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	1960-2008
32	1 223U	TABLADO DE LANA	TP	155	05-52-47W	43-08-30	265801,2	4780659,3	640	S	1978-2008

Tabla 3. Características y periodo de funcionamiento considerado para las estaciones utilizadas en el estudio climático

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.

4.1.1 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 la de 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 32 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.

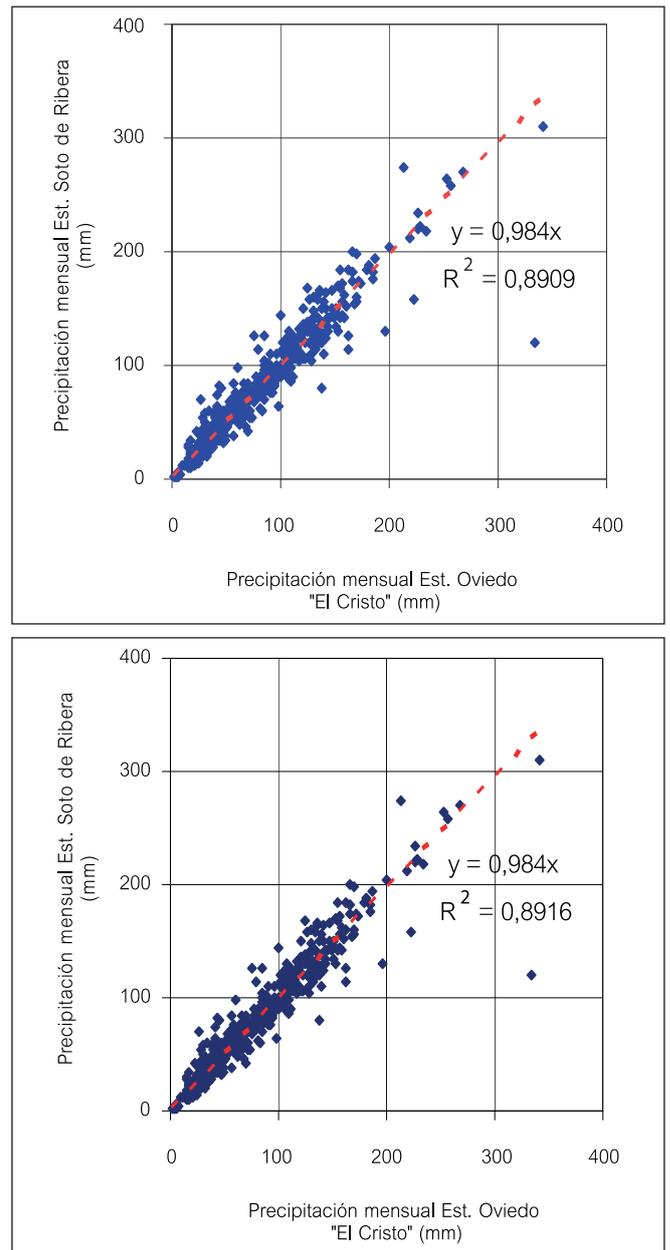


Figura 32. Correlación y ecuación de la recta de regresión entre los datos brutos (izda) y los datos completados (dcha) de una estación problema y una estación base para una misma serie

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 – 2007/08.

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 anteriormente– 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 49 (apartado de Resultados) y concuerda con la publicada por otros autores (IGME, 1984; MOPU, 1988; Marquínez et al., 2003).

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 50 y en la Figura 51.

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 termopluviométrica. Este cálculo fue realizado para cada uno de los años hidrológicos del periodo y para cada una de las estaciones, así como utili-

zando 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 explicó y el resultado se muestra en forma de mapas de isotermas, evapotranspiración potencial y real e isoyetas de lluvia útil, en la Figura 52, la Figura 53, la Figura 54 y la Figura 55, respectivamente. Como aplicación de lo anterior, se recoge el balance medio anual realizado con los datos de la Estación de ‘San Andrés de Mieres, en el Valle del Turón, en el apartado de Resultados.

4.2 Estudio hidrológico

4.2.1 Caudales de máxima avenida

Como se observa en la Figura 39, la cuenca del río Turón tiene una superficie total de 56,84 km². Se ha procedido a calcular los caudales de máxima avenida en dicha cuenca, para varios periodos de retorno, según distintos métodos que se describen en la sección de resultados. Sin embargo, para su aplicación, es necesario en primer lugar realizar un estudio pluviométrico de la zona, para conocer las máximas intensidades de precipitación históricas que permitan hacer una estimación de las posibles máximas avenidas futuras.

Estudio pluviométrico

Se realizará un análisis de frecuencia de presentación de aguaceros en la zona de estudio, a partir de datos históricos de precipitación diaria recogidos en la estación pluviométrica más próxima y con mayor serie de datos, con el fin de calcular la precipitación máxima en 24 h asociada a cada uno de los periodos de retorno considerados.

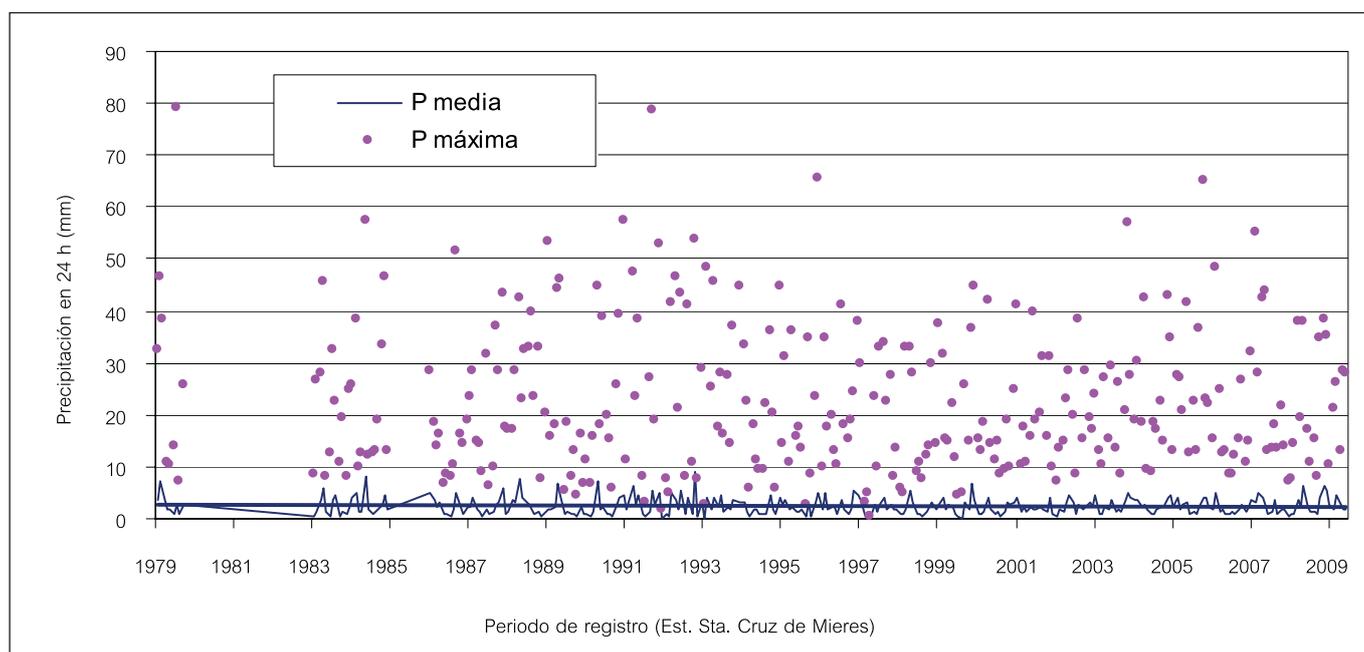


Figura 33. Valores medios y máximos mensuales de precipitación en 24 horas en la zona de estudio

Para este estudio se han considerado los datos diarios de precipitación registrados en la Estación Termopluviométrica de Santa Cruz de Mieres, facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), por ser, dentro de las estaciones más próximas a la zona de estudio, la que cuenta con una serie más completa de datos de calidad (1979-2009). Esta estación se encuentra ubicada en las coordenadas UTM (274785.8, 4785606.6) y a 280 m de altitud. A partir de los datos diarios, se ha obtenido la máxima precipitación en 24 horas para cada uno de los meses del periodo de registro.

Como se aprecia en la figura 33, el valor medio de precipitación en 24 h durante el periodo de registro de la estación pluviométrica considerada (1979-2009) es de 2,4 mm/24h (valor estacionalmente muy variable). Sin embargo, los valores máximos mensuales registrados varían ampliamente desde este valor hasta incluso casi 80 mm/24h, registrados en un par de ocasiones, aunque aguaceros por encima de 40 mm/24h sólo se han registrado un 0,45% de los días. La distribución de estas precipitaciones extremas, si bien irregular, se distribuye preferentemente durante algunos meses del año, como se observa en la Figura 34, en la que se ve que es sobre todo en el mes de Abril (10 eventos), seguido por los meses de Febrero, Mayo, Noviembre y Diciembre (5 eventos) cuando históricamente ha sido mayor la frecuencia de aparición de lluvias con intensidades superiores a 40 mm/24h.

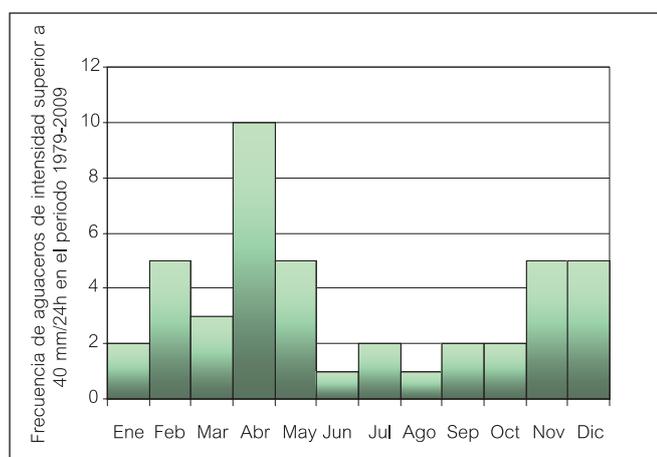


Figura 34. Histograma de frecuencias de precipitaciones de intensidad superior a 40mm/24h

En la siguiente tabla (Tabla 4) se recogen los valores máximos anuales de precipitación en 24h durante el periodo de registro de la estación de Sta. Cruz de Mieres.

Se observa que el día de mayor precipitación del periodo de 26 años considerado (11-7-79) se registraron 79 mm/24 h.

Durante el periodo 2003-2008, ha sido posible registrar en la estación automática de Santa Cruz de Mieres la precipitación recogida en periodos diezminutales, lo que permite obtener la intensidad máxima de precipitación en una hora, así como la hora de mayor precipitación del día. Para dicho periodo, los valores de máxima precipitación horaria se muestran en la siguiente gráfica (Figura 35), en la que se observa que en el 96% de los casos se registran

valores inferiores a 10 mm/h y sólo en un 3 y un 1% se registran intensidades superiores a 10 y 20 mm/h, respectivamente, alcanzándose un valor máximo de 61,2 mm/h el 7-6-03.

Año	P máxima en 24h (mm)	Año	P máxima en 24h (mm)
1979	79,0	1996	41,0
1983	45,5	1997	34,1
1984	57,6	1998	33,2
1986	51,5	1999	44,8
1987	43,6	2000	42,0
1988	42,3	2001	41,0
1989	53,4	2002	38,4
1990	57,5	2003	56,8
1991	78,5	2004	43,0
1992	53,6	2005	65,0
1993	48,2	2006	48,5
1994	45,0	2007	55,0
1995	65,5	2008	38,5

Tabla 4. Máximos valores anuales de precipitación en 24 h registrados en Sta. Cruz de Mieres

En lo que se refiere a la distribución de la precipitación a lo largo del día, se observa que en el periodo de registro, la hora en la que con mayor frecuencia se registran las máximas intensidades de precipitación son las 14 h. Se ha representado en la siguiente figura la precipitación registrada cada hora en los días de mayor intensidad de precipitación y se observa que las puntas de precipitación se producen durante un periodo de 2 horas como máximo. Además, cabe destacar que como la intensidad máxima horaria se calcula multiplicando por 6 el mayor valor diezminutal registrado, en realidad dicho parámetro sobrestima la intensidad real. Por ejemplo, en el día 7-6-03, de máxima intensidad del periodo (61,2 mm/h), en realidad, sólo llovió durante 3 horas, registrándose durante las mismas un total de 3,4, 12,6 y 12,6 mm, respectivamente, es decir, en ninguna hora del día se han alcanzado 61 mm de precipitación. Lo mismo podría decirse del día 9-6-07, con una intensidad máxima horaria de 60 mm/h y en el que sólo se registró precipitación durante una hora, con un total de 10,8 mm (aunque presumiblemente se registraron casi sólo en un periodo de diez minutos dentro de esa hora).

Frecuencia de presentación de aguaceros

Para determinar la probabilidad de presentación de un aguacero en función de su intensidad media y para una duración dada, se sigue la aproximación clásica de ajustar las máximas intensidades anuales registradas para distintas duraciones a una ley teórica de probabilidad que suele ser la denominada ley de Gumbel.

Dado que en este caso se dispone de las máximas precipitaciones registradas en periodos de 24 h, esa será la duración del aguacero considerada. Dichos valores (Tabla 4) se ajustarán a una distribución de Gumbel para estimar las máximas intensidades esperables para distintos periodos de retorno.

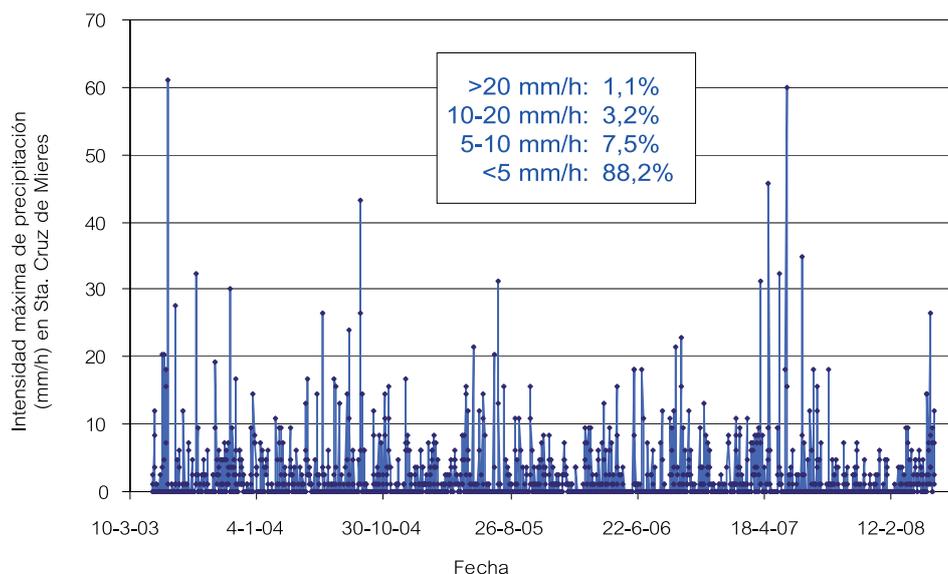


Figura 35. Intensidad máxima horaria de cada día del periodo de registro de dicha variable en la Estación de Sta. Cruz de Mieres

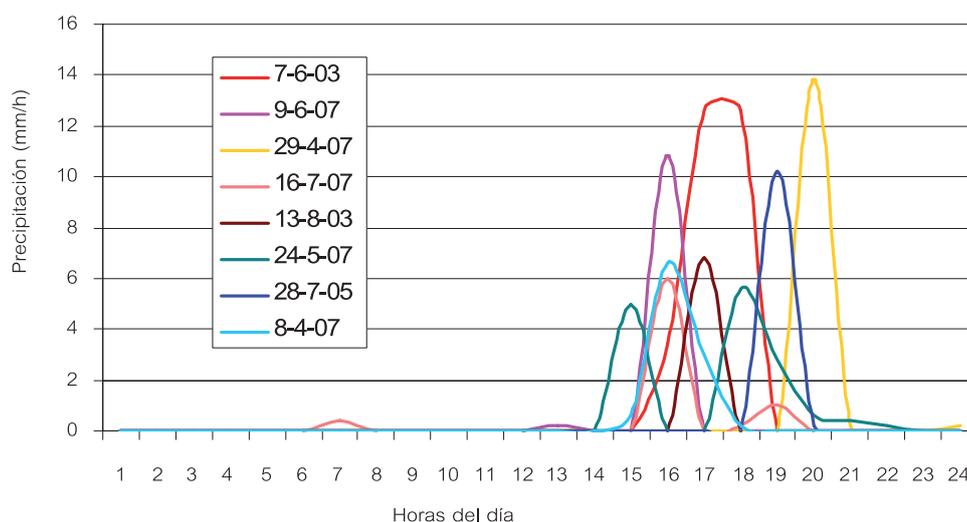


Figura 36. Precipitación a lo largo de las 24 horas de los días de mayor intensidad de precipitación en la Estación de Sta. Cruz de Mieres durante el periodo 2003-2008

La ley de distribución de frecuencias de Gumbel se utiliza para el estudio de valores extremos. La probabilidad de que se presente un valor *inferior* a x es:

$$F(x) = e^{-e^{-b}} \quad (\text{Chow et al., 1994}), \text{ siendo:}$$

$$b = \sigma_y \left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma_x} \right) + \mu_y;$$

\bar{x} y σ_x = media aritmética y desviación típica de la población muestral, respectivamente. En este caso, toman los valores de 50,10 y 11,98, respectivamente.

σ_y y μ_y = coeficientes que dependen del número de datos de la población. En este caso, $\sigma_y = 1,0961$ y $\mu_y = 0,5321$.

La probabilidad de que se presente un valor *superior* a x será, por tanto: $1-F(x)$

Mediante estas expresiones se puede calcular la frecuencia (porcentaje o tiempo de retorno) con la que se presentará una cierta precipitación a partir del valor x . Sustituyendo se obtiene p.e. que la probabilidad de que se produzca una precipitación superior a 40 mm/24h al año [$1-F(x)$ siendo $x=40$] es del 77% (periodo de retorno: 1,3 años), mientras que sólo un 9% de los años (periodo de retorno: 11 años) registrarán un valor superior a 70 mm/24h.

En Hidrología se utiliza más el periodo de retorno (periodo de tiempo –en años– en que un determinado evento es igualado o superado al menos una vez) que la probabilidad; así, se habla de la crecida de periodo de retorno $T = 50$ años, en lugar de referirse a aquella con una probabilidad de presentarse del 2% ($P = 1/T$).

Para solucionar el problema inverso (precipitación que se producirá cada n años), una vez fijado el periodo de retorno, que determina el valor de F(x), se despeja x en la expresión de Gumbel, siendo b:

$$b = -\ln(-\ln(F(x))) = \sigma_y \left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma_x} \right) + \mu_y \quad (\text{Sánchez, 2008})$$

De esta forma se obtienen las máximas precipitaciones en 24 h esperables para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años (Tabla 5). Se observa que la máxima precipitación que cabe esperar que ocurra en un día, para un periodo de retorno de 500 años es de 112 mm.

T = Periodo de retorno (años)	Probabilidad P = 1/T = 1-F(x)	F(x)	b	P _{max} (mm/día)	I _d (mm/h)
2	50%	50%	0,37	48,	2,0
5	20%	80%	1,50	60,7	2,5
10	10%	90%	2,25	68,9	2,9
25	4%	96%	3,20	79,2	3,3
50	2%	98%	3,90	86,9	3,6
100	1%	99%	4,60	94,5	3,9
200	0,5%	99,5%	5,30	102,1	4,3
500	0,2%	99,8%	6,21	112,2	4,7

Tabla 5. Intensidad máxima de precipitación para distintos periodos de retorno, según el método de ajuste de Gumbel



C _v	T	FACTOR DE AMPLIFICACIÓN K _T (T, C _v)							
		2	5	10	25	50	100	200	500
0.30	0.935	1.194	1.377	1.625	1.823	2.022	2.251	2.541	
0.31	0.932	1.198	1.385	1.640	1.854	2.068	2.296	2.602	
0.32	0.929	1.202	1.400	1.671	1.884	2.098	2.342	2.663	
0.33	0.927	1.209	1.415	1.686	1.915	2.144	2.388	2.724	
0.34	0.924	1.213	1.423	1.717	1.930	2.174	2.434	2.785	

T = Periodo de retorno (años)	K _T	P _{max} (mm/día)	I _d (mm/h)
2	0,924	61,0	2,5
5	1,213	80,1	3,3
10	1,423	93,9	3,9
25	1,717	113,3	4,7
50	1,930	127,4	5,3
100	2,174	143,5	6,0
200	2,434	160,6	6,7
500	2,785	183,8	7,7

Tabla 6. Intensidad máxima de precipitación para distintos periodos de retorno según el método de las isohietas

También se pueden obtener las precipitaciones máximas diarias para un periodo de retorno utilizando el *Mapa para el cálculo de máximas precipitaciones diarias en la España Peninsular*, editado por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento (1997), que se muestra para la zona de estudio a continuación. En este caso, se toma C_v = 0,34, con el que se obtiene el valor del coeficiente de amplificación k_T, para cada periodo de retorno, y finalmente los resultados de la Tabla 6, teniendo en cuenta que P_{max} (mm/día) es igual a la P_{max} diaria anual obtenida del mapa (en este caso, 66 mm/día) multiplicada por dicho coeficiente.

Se puede observar que las precipitaciones calculadas por el ajuste de Gumbel son inferiores a las obtenidas con los mapas de isohietas para cualquier periodo de retorno, pero se prefiere considerar para cálculos sucesivos los obtenidos mediante el ajuste de Gumbel, por considerarse más exacto y ajustado a la zona de estudio.

Los cálculos del caudal de máxima avenida estimado por varios métodos se presentan en la sección de Resultados.

4.2.2 Aforos de caudal

Debido a la inexistencia de estaciones foronómicas en el río Turón, se están realizando periódicamente aforos directos mediante el método del molinete (Figura 38). Este método consiste en la medición de la velocidad del agua en cada una de las secciones objeto de estudio. El molinete es un instrumento que consiste básicamente en una hélice sumergida que se orienta en la dirección de la corriente y que gira por la presión debida a la velocidad del agua. El eje de esta hélice transmite su movimiento, por medio de un sistema de engranaje, a un excéntrico que establece sucesivos contactos en un circuito eléctrico, que transmite las indicaciones a un contador de vueltas. La velocidad se determina en función del número de vueltas, según las características del modelo que se utilice y con arreglo a fórmulas o parámetros determinados por la casa constructora del aparato. La ecuación general de calibrado es del tipo v = a·r + b, en la que r son las revoluciones por minuto obtenidas en el contador, y a y b son coeficientes que dependen del tipo de hélice utilizada.

Si el río es vadeable, como es el caso, el molinete se monta en una varilla que se va apoyando en el fondo, a altura variable sobre la misma, de acuerdo con el número de observaciones que se vayan a hacer en cada perfil. El molinete debe colocarse aguas arriba del operador y a la mayor distancia posible a fin de que no influya en la medida la perturbación que pueda ocasionar el propio operador.

Una vez obtenida la velocidad media de la sección, el caudal se calcula como producto de dicho término por el área total de la sección, que previamente se ha de determinar. Para la realización de este proyecto se dispone de un **molinete digital**, que acumula velocidades instantáneas, facilitando un valor medio tras recorrer la sección, así como un **minimolinete mecánico** muy útil en casos de bajo caudal y reducida velocidad de la corriente, que se

dan en cauces pequeños y/o en épocas de aguas bajas (estiaje).

Adicionalmente, se ha utilizado de forma puntual el método de **aforo químico**, fundamentalmente con objeto de validar las medidas realizadas con el método de aforo descrito. Este método está 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 utilizado es el de integración o inyección instantánea (Figura 37), que 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.

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

Para la realización de los aforos químicos se ha utilizado el dispositivo de marca "Etrelec" denominado "Easyflow". 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.

El caudal del río Turón se determina periódicamente en tres puntos de aforo, antes de su desembocadura al río Caudal. Las secciones de aforo se seleccionaron aguas arriba y abajo de las labores mineras, con el fin de evaluar la influencia de las mismas sobre el caudal del río. En la Figura 40 se observan las secciones de aforo, las cuales se corresponden con los puntos cuyas coordenadas se muestran a continuación:

Sección	Coordenadas			Observaciones
	X	Y	Z	
La Granxa	281.593	4.788.343	375	Punto aguas arriba de los pozos Fortuna y Santa Bárbara.
La Veguina	277.242	4.787.880	280	Punto aguas abajo de los Pozos San José y Santa Bárbara
Peñule	274.749	4.787.996	230	Punto aguas abajo del Pozo Flgaredo

Tabla 7. Coordenadas de las secciones de aforo del río Turón

Así, en la cuenca del Turón, que tiene una superficie total de 56,84 km², se establecen 3 subcuencas (ver Figura 39):

La primera, aguas arriba de la sección de aforo 1 (La Granxa) y con una superficie de cuenca aproximada de 17,78 km², corresponde a la cabecera del río y a una zona prácticamente "virgen" o no minada. En esta subcuenca, supuesta nula la presencia de labores mineras, la infiltración será la propia natural del terreno, que dadas sus características geológicas, se considera baja.

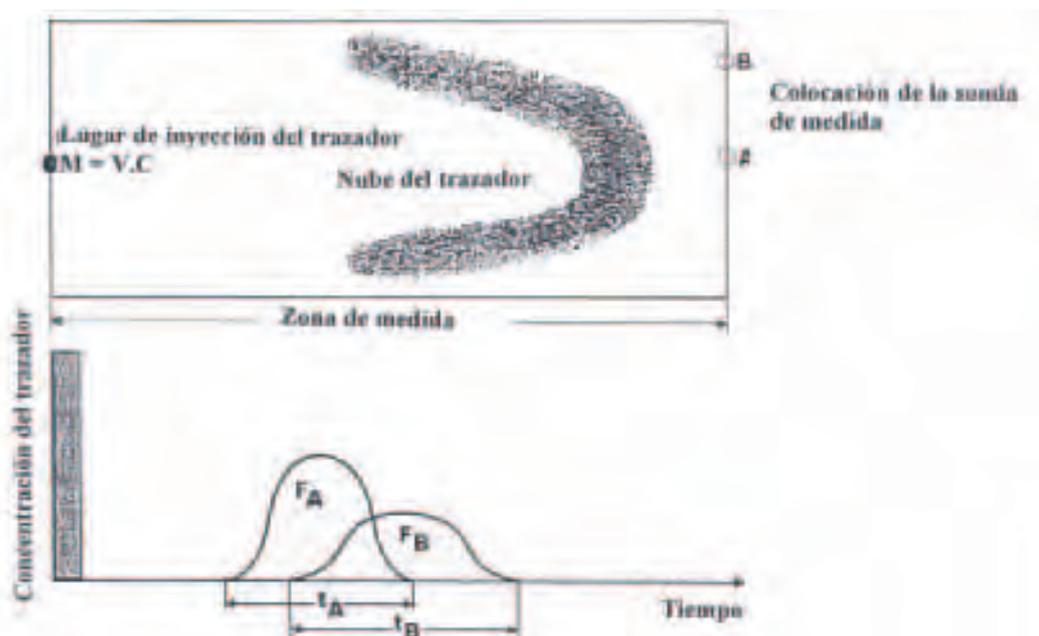
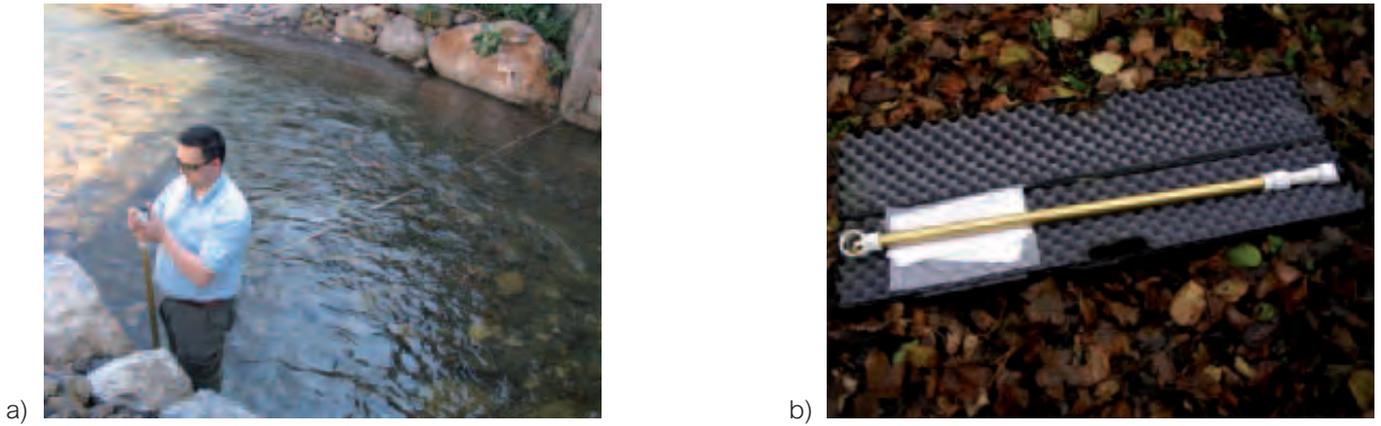


Figura 37. Esquema del método de inyección instantánea



c) $A = 2,09m^2$
 $v = 0,426m/s \rightarrow Q = 890,3l/s$

Figura 38. a) Aforo con molinete; b) Detalle del molinete; c) Ejemplo para el cálculo del caudal a partir del trazado de la sección del cauce del río y la determinación de la velocidad media para la misma.

La segunda subcuenca, aguas abajo de la anterior, corresponde a la cuenca de afección de las labores correspondientes a los pozos Santa Bárbara y San José (20,47 km²). En este caso, comparado con el anterior, la infiltración se ve incrementada debido al aumento de la fracturación y porosidad secundaria causada por la presencia de labores subterráneas.

La tercera subcuenca, con una superficie aproximada de 18,59 km², aguas abajo de la anterior, se extiende abarcando una zona extensamente minada (labores correspondientes a los pozos Figaredo y Barredo) y en ella se supone se produce una relativamente importante infiltración a través de la zona minada.

Además de los datos que se están recogiendo durante el presente año, se dispone de datos anteriores (2007), obtenidos cuando aún estaba establecido el bombeo del agua infiltrada a los pozos, que luego era vertida al río. Estos resultados se recogen en el apartado homónimo.

El método de aforo descrito proporciona lógicamente valores puntuales del caudal en cada sección de aforo considerada. Con objeto de disponer de datos continuados en el tiempo, para la realización de un **hidrograma**

representativo en cada sección, 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 algún método de aforo directo anteriormente descrito), para la obtención de una **curva de gastos** (caudal *versus* altura limnimétrica) lo bastante fiable como para permitir obtener el caudal a partir de la altura medida diariamente sobre la escala, por medio de la relación deducida en dicha curva. El aforo indirecto es realizado diariamente por personas residentes en la zona y el directo se realiza al menos una vez al mes por personal del equipo de trabajo.

De esta forma, para el presente trabajo, **se ha realizado una campaña de aforos del río Turón bastante intensiva (aforo quincenal desde marzo de 2009 y diario desde mayo de 2009). A fecha de la realización de este informe, el periodo de muestreo abarca 8 meses, aunque sería deseable continuar con las mediciones al menos durante un año hidrológico.**

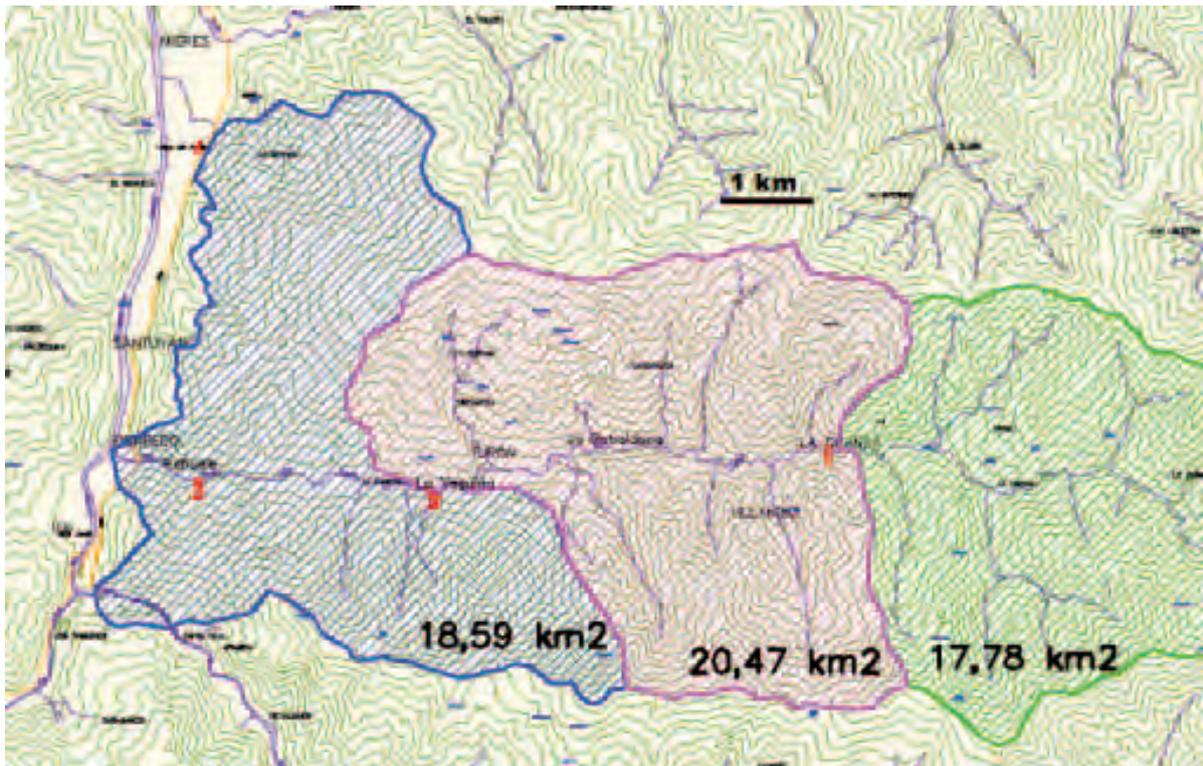


Figura 39. Subcuencas en las que se ha dividido la zona de estudio

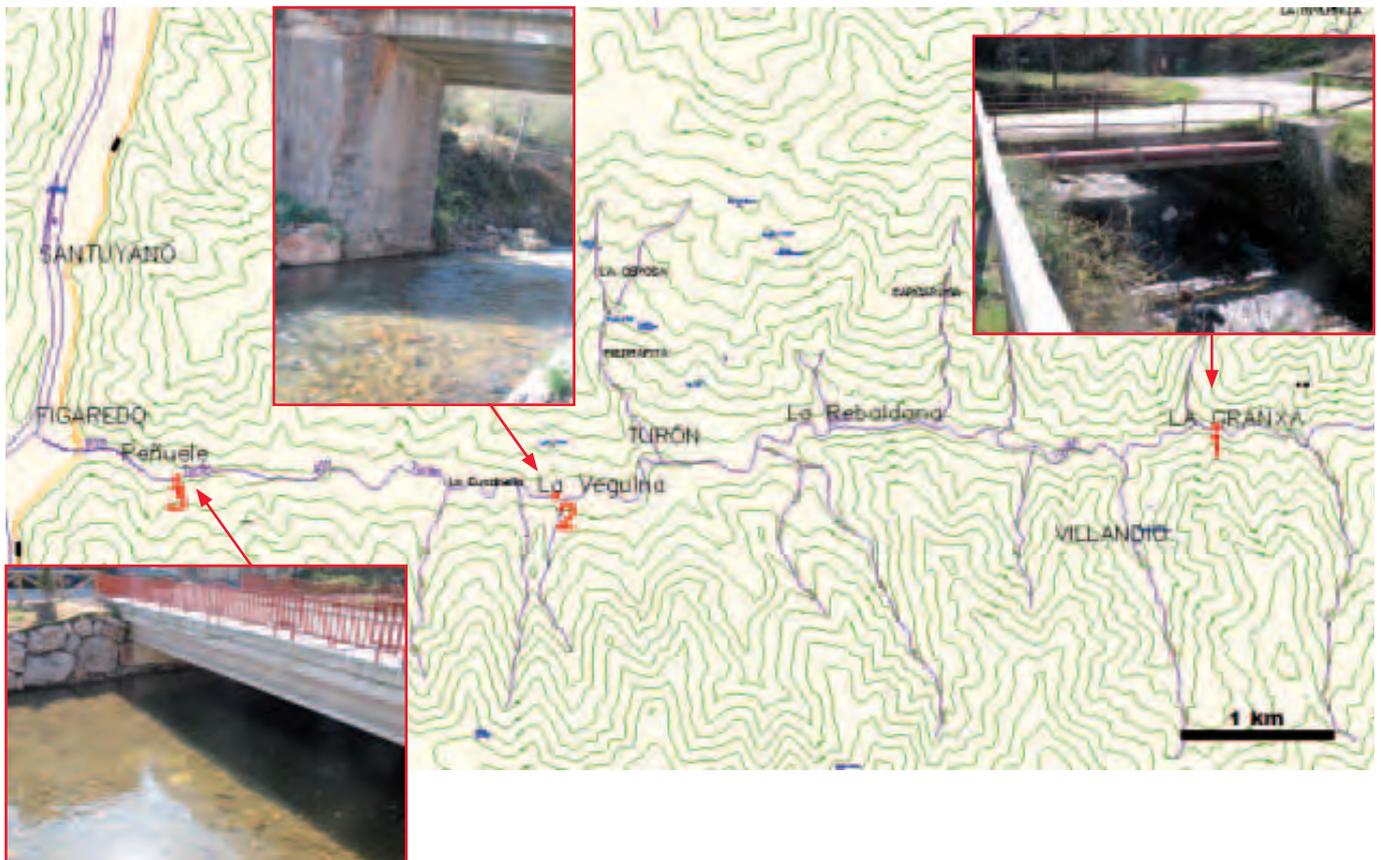


Figura 40. Mapa de situación de las secciones de aforo

4.2.3 Calidad de agua superficial

Además de la determinación del caudal, en cada uno de los puntos de aforo se determinan in-situ un conjunto de parámetros como son pH, salinidad, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, turbidez, temperatura y Eh, mediante el empleo de una sonda multiparamétrica, marca TURO, con el objetivo de obtener información acerca de la calidad de las aguas.

Además de los datos que se están recogiendo durante el presente año, se dispone de datos anteriores (2007), cuyos resultados se muestran más adelante por su interés, dado que fueron obtenidos antes de la interrupción del bombeo, cuando el río recibía por tanto el aporte del vertido de agua de mina, lo cual, por otra parte, ha empezado a ocurrir de nuevo en los últimos meses del presente año, al reanudarse el bombeo en el pozo San José, como se verá.

4.2.4 Caudal ambiental

El término caudal ecológico designa el valor de caudal que en un momento dado debe mantenerse en un tramo de río sometido a algún tipo de regulación, con el fin de asegurar un nivel de funcionalidad aceptable de los ecosistemas fluviales, asumiendo que dicho caudal determina, en última instancia, la habilidad o capacidad del medio para favorecer el desarrollo de las distintas comunidades. De este modo, la funcionalidad ecológica se asocia, entre otros aspectos, a la variabilidad de las condiciones físicas, químicas y biológicas generadas por las masas de agua circulantes, aspecto que le confiere una dimensión temporal y espacial, que se refleja en la adopción, más reciente, de un concepto más apropiado, el de régimen de caudales ecológicos (Revilla, 2007).

El régimen de caudales ecológicos se establecerá de modo que permita mantener de forma sostenible la funcionalidad y estructura de los ecosistemas acuáticos y los ecosistemas terrestres asociados, contribuyendo a alcanzar el buen estado o potencial ecológico en ríos o aguas de transición (Instrucción de Planificación Hidrológica, Ministerio de Medio Ambiente-Confederación Hidrográfica del Norte, borrador versión 11.22, de Febrero 2008).

En referencia al estado actual del nuevo régimen de caudales ecológicos se debe tener en cuenta el punto de partida, es decir, el Plan Hidrológico Nacional vigente y la Norma 2.1.2.12.- Caudales mínimos medioambientales del Plan Hidrológico Norte I, de Diciembre 1997.

El Plan Hidrológico Nacional vigente establece el caudal mínimo medioambiental como el caudal que respetado en el cauce permite mantener en el río y su entorno unas condiciones próximas a las existentes antes de la intervención. Su finalidad es conservar:

- Las características físico-químicas del río.
- Las poblaciones vegetales y animales del cauce, márgenes y riberas.
- La recarga de acuíferos.

- Las zonas húmedas dependientes del caudal circulante.
- La calidad de las aguas, y los usos del agua preexistentes.
- Las funciones recreativas y de esparcimiento que se desarrollaban en base al río.

En el Plan Hidrológico vigente se define el caudal mínimo medio-ambiental como el caudal que respetado en el cauce permite mantener en el río y su entorno unas condiciones próximas a las existentes antes de la intervención. El caudal mínimo a circular en el cauce no será inferior a **un décimo del caudal medio interanual**, con un mínimo de 50 l/s en ríos con caudales permanentes todo el año, o a la totalidad del caudal natural fluyente si este fuese menor a un décimo o a 50 l/s. (Plan Hidrológico Norte I, Ministerio de Medio Ambiente, de Diciembre 1997).

4.2.5 Inventario de puntos de agua

Este apartado se basa en el Inventario de puntos de agua realizado por HUNOSA en el informe "Estudio sobre la Inundación de los Pozos Mineros en la Zona Barredo – valle del Turón – valle del Aller" (Convenio HUNOSA, 2008). Para esta base de datos se partió de los 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, 2003), el inventario realizado por la Consejería de Cultura, Comunicación Social y Turismo del Principado de Asturias (Fernández Gutiérrez, 2004), y el inventario recogido en Cienfuegos (2002), entre otros. A partir de esta información se realizó una revisión y selección de los puntos inventariados.

El inventario de puntos de agua se elaboró 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. Además de los datos de situación, caudal, litología y uso del agua, se incorporarán parámetros físico-químicos (pH, conductividad eléctrica, temperatura ambiente y del agua) de algunos de los puntos.

Se inventariaron manantiales, pozos mineros y galerías mineras dentro de los límites de la zona de trabajo. El listado de los mismos se recoge en el apartado de Resultados.

La numeración de los puntos se realizó 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.

4.3 Cubicación de volúmenes de huecos

4.3.1 Introducción

Como se ha visto, la aparición de la minería de montaña hace que una parte muy importante de la circulación hídrica se introduzca en el interior del macizo rocoso a través de las alteraciones próximas a la superficie ocasionadas por esta minería, facilitando la infiltración de la precipitación y, a través de los huecos de los terrenos minados, provocando un aumento considerable de la recarga de agua en el “embalse minero”. Esta incidencia queda manifiesta en la Figura 41, que muestra la relación entre el desagüe del conjunto de explotaciones afectadas por el valle del río Turón entre Enero de 1999 y Diciembre de 2004 y la lluvia registrada durante el mismo periodo en la estación meteorológica de Santa Cruz de Mieres, situada en el sector SO de la zona de estudio, a unos 6 km al Sur del Pozo Barredo.

Para la realización de la Figura 41 se han utilizado los datos de la Tabla 8, según estimaciones hechas por HUNOSA.

Analizando el gráfico anterior, se puede observar, por un lado, un claro descenso del volumen desaguado du-

rante los meses de verano, en los que la precipitación registrada es menor, y por otro, que la infiltración del agua de lluvia en el macizo carbonífero se produce con un desfase o periodo de retardo inferior a un mes, pero no cuantificable con exactitud al disponer sólo de datos mensuales y no poder precisar intervalos menores entre los periodos de máxima precipitación y los de mayor bombeo. Por tanto, para estimar el periodo de retardo deberán utilizarse datos diarios de bombeo, como se verá más adelante.

En definitiva, en este entorno se ha formado el ya comentado “acuifero” nuevo de triple porosidad, similar a la de los acuíferos carbonatados kársticos (galerías y capas explotadas), porosidad por fractura (macizo rocoso) y porosidad de la matriz (roca y carbón) (Pendás y Loredó, 2006).

4.3.2 Principales conexiones entre los Pozos Barredo y Figaredo

Como se observa en la Figura 42, en la que se representan esquemáticamente las cañas de los pozos Barredo y Figaredo, señalando las cotas de sus plantas y el nivel de cota 0, la principal conexión entre ambos pozos se sitúa a la altura de 5ª planta de ambas explotaciones, a la cota común aproximada de -135 m.s.n.m. (Jardón, 2008).

Año	Volumen desaguado (m3)				
	Pozo Barredo	Pozo Figaredo*	Pozo San José	Pozo Santa Bárbara	Total
1999	1.923.013	1.400.000	Sin dato	0	-
2000	1.552.926	1.400.000	4.580.352	0	-
2001	1.245.986	1.400.000	3.498.624	266.310	6.410.920
2002	1.256.115	1.400.000	3.556.416	306.570	6.519.101
2003	1.426.115	1.400.000	3.873.087	489.083	7.188.285
2004	1.932.330	1.400.000	Sin dato	Sin dato	-
Media anual	1.556.081	1.400.000	3.877.120	213.393	6.912.896

* El volumen anual drenado en el conjunto de explotaciones del Pozo Figaredo (Pozos San Vicente y San Inocencio) se ha tomado a partir de las estimaciones hechas por HUNOSA en sus informes de desagüe.

Tabla 8. Volumen desaguado de los pozos de los valles de los ríos Caudal y Turón (Bueno, 2005)

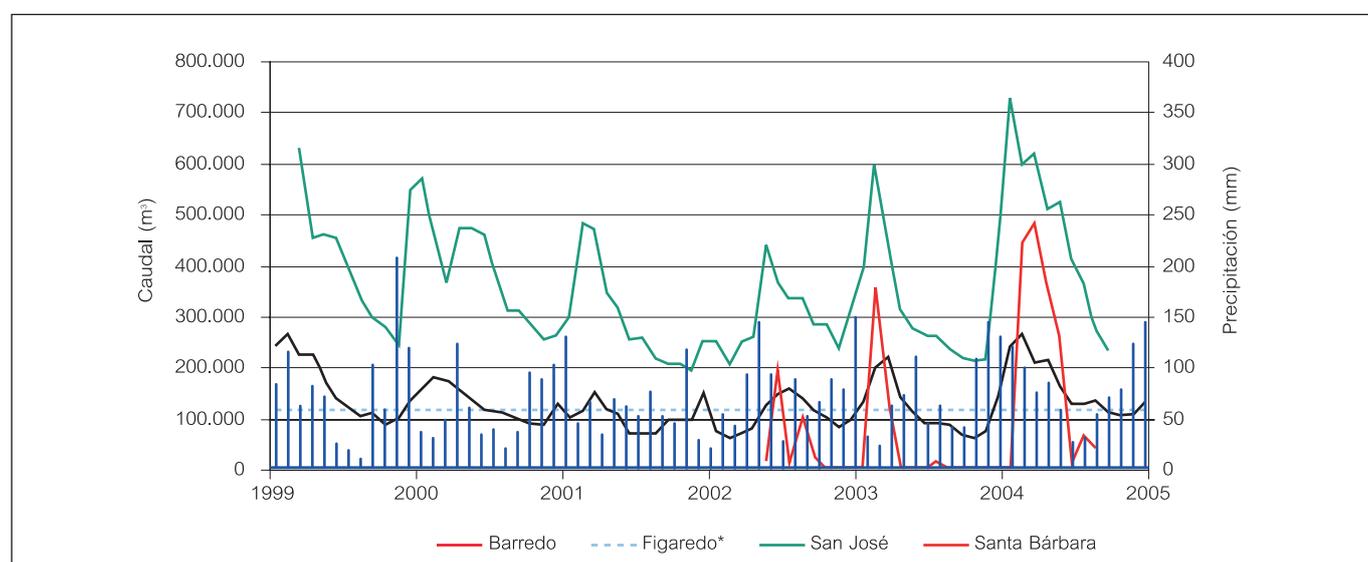


Figura 41. Relación entre el caudal desaguado mensualmente en las explotaciones mineras de la zona de estudio y la precipitación media mensual (barras de color azul) entre Enero de 1999 y Diciembre de 2004 (Bueno, 2005)

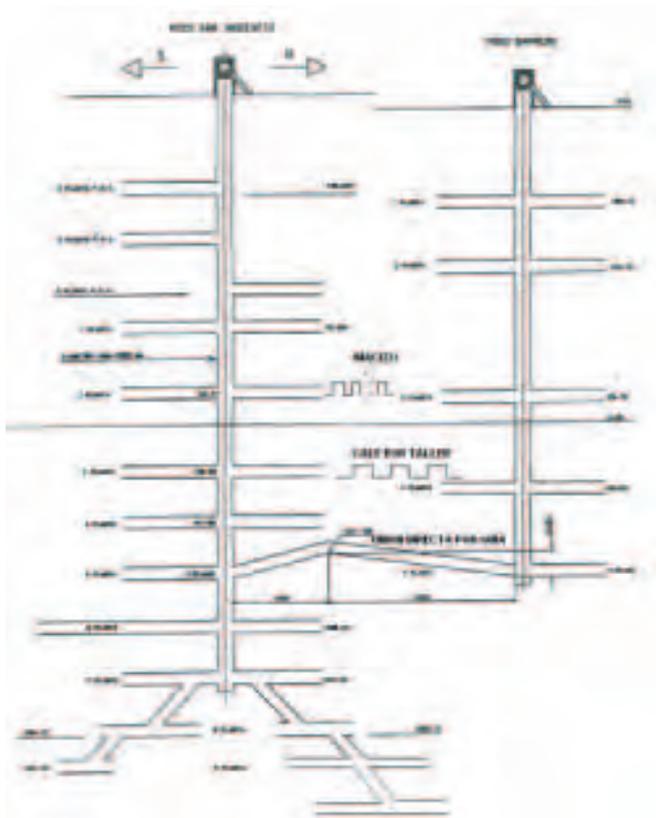


Figura 42. Embalse minero del conjunto Barredo-Figaredo

El enlace se produjo por la guía de la capa 24 Norte de Figaredo que se corresponde con la capa 10ª Muro de Barredo, que, siendo utilizada en el Pozo Barredo como galería de base, pasó a ser galería de cabeza en el pozo Figaredo. Dado que la cota exacta de ambas plantas, en las cañas de ambos pozos, es de -135,5 m.s.n.m. y que el cale se produjo a una distancia de 3.300 m de la caña de Barredo y 1.050 m de la de Figaredo, el efecto de la pendiente de ambas galerías produjo en el punto de cale una diferencia de cotas entre ellas de 4 m, obligando a la ejecución de un pequeño plano inclinado, de 20 m de longitud, para salvar la diferencia de cotas y poder efectuar el transporte de material, a la vez que servía como retorno de ventilación para el panel que se iba a explotar en Figaredo. La cota en el punto de conexión es de -121,99 m.s.n.m.

La primera chimenea para la explotación de la capa 24 Norte de Figaredo se caló en mayo de 1994, finalizando la explotación del panel en octubre de 1995, es decir se empezó la explotación del sector Norte de Figaredo después del cierre de Barredo (1993). Posteriormente se explotaron también por el método de entibación auto-desplazable los correspondientes paneles entre la 6ª y la 9ª Planta.

En esta misma zona se explotó igualmente un panel de unos 500 m de longitud sobre la capa 22 Norte de Figaredo, correspondiente a la capa 9ª Muro de Barredo, entre la 5ª y la 6ª Planta de Figaredo, pero sin conexión con Barredo al no tenerla guiada por 5ª Planta.

También existe un cale desde el taller de la capa 12ª Sur 7º Recorte entre la 3ª y la 4ª Planta del Pozo Barredo

con el Transversal de 3ª Planta del Pozo Figaredo; la conexión se produjo a una cota aproximada de 10 m por encima de 4ª Planta de Barredo.

Además, la explotación de la capa 10ª Muro entre la 2ª y la 3ª Planta del Pozo Barredo en su límite Sur y entrando en la concesión de Figaredo, se solapa con la explotación entre la 2ª y la 3ª Planta de Figaredo, quedando un macizo en capa de unos 25 m entre la 3ª Planta de Barredo y la 2ª Planta de Figaredo en el punto más desfavorable, con una longitud de solapamiento de unos 400 m.

Resumiendo, las conexiones entre los Pozos Barredo y Figaredo son las siguientes:

- 5ª Planta Barredo (cota -135,5 m.s.n.m.) tiene enlace directo con la galería de 5ª Planta de Figaredo (cota -135,045 m.s.n.m.). La cota en el punto de conexión es -121,99 m.s.n.m.
- El taller 7º Recorte entre 3ª - 4ª Planta de Barredo caló al Transversal de 3ª Planta de Figaredo (cota -31,680 m.s.n.m.) a una cota 10 m por encima de 4ª Planta de Barredo (cota -47 m.s.n.m.). Es decir, la cota aproximada del cale es de -37 m.s.n.m.
- La explotación de la capa 10ª Muro entre 2ª - 3ª Planta de Barredo (Zona Sur) ha entrado en la concesión de Figaredo (sector Norte) solapándose con la explotación de éste entre su 2ª - 3ª Planta. El macizo de protección en el punto más desfavorable es de unos 25 m en capa entre 3ª Planta de Barredo y 2ª Planta de Figaredo. Este solape tiene una longitud de 400 m (Jardón, 2008).

El hueco existente por debajo de la cota final del agua, una vez inundados ambos pozos, definirá el volumen del embalse subterráneo. Este límite superior del embalse minero se mantiene, en el momento de redacción de este informe, a 70 m del brocal del pozo Barredo, es decir, a cota +150 m.s.n.m., aunque no se descarta que pueda modificarse en el futuro.

4.3.3 Cálculo de huecos

A efectos de la capacidad de agua, se ha de tener en cuenta que la explotación con relleno del hueco deshullado produce una convergencia de hastiales con compactación de los materiales de relleno y una fracturación de los estratos al techo de la capa explotada, con lo que el resultado final es un "acuífero" con dos porosidades principales: la porosidad del relleno y la porosidad por fractura. En cambio, en la explotación por hundimiento se produce un colapso del techo que va produciendo sucesivos colapsos en los huecos producidos hasta su estabilización, con lo que el resultado final es un acuífero con dos porosidades principales: una porosidad similar a la de un acuífero kárstico (los huecos del colapso del techo) y la porosidad por fractura en los estratos superiores de la zona ya estabilizada.

Por lo tanto, el hueco útil será el resultante de multiplicar el volumen deshullado por dos coeficientes diferentes, según el tipo de explotación, que suponen la reducción porcentual del hueco inicial abierto.

Cálculo de volumen deshullado

En primer lugar se determinaron las toneladas de carbón arrancadas por cada nivel en los pozos Barredo y Figaredo, para lo cual se consultaron 59 planes de labores conservados en el Archivo Histórico de Oviedo (1970-1980) y en el archivo de la Dirección General de Minería y Energía (1981 a la actualidad), así como otra información disponible y facilitada por el Archivo Histórico de HUNOSA y la Cámara Oficial Minera de Asturias. Puesto que los planes de labores anteriores a 1970 han sido destruidos, sólo se han podido consultar aquellos que van desde 1970 hasta el cierre de las minas (1992 en el caso de Barredo y 2006 en el caso de Figaredo), por lo que es imposible determinar por estos medios los volúmenes extraídos entre la apertura de las mismas y 1970, pero sí permiten determinar de una manera bastante exacta el hueco disponible entre determinados niveles, de forma que conocido este hueco y comparándolo con el volumen de agua infiltrada para llenar el “embalse minero”, es posible deducir el hueco total disponible.

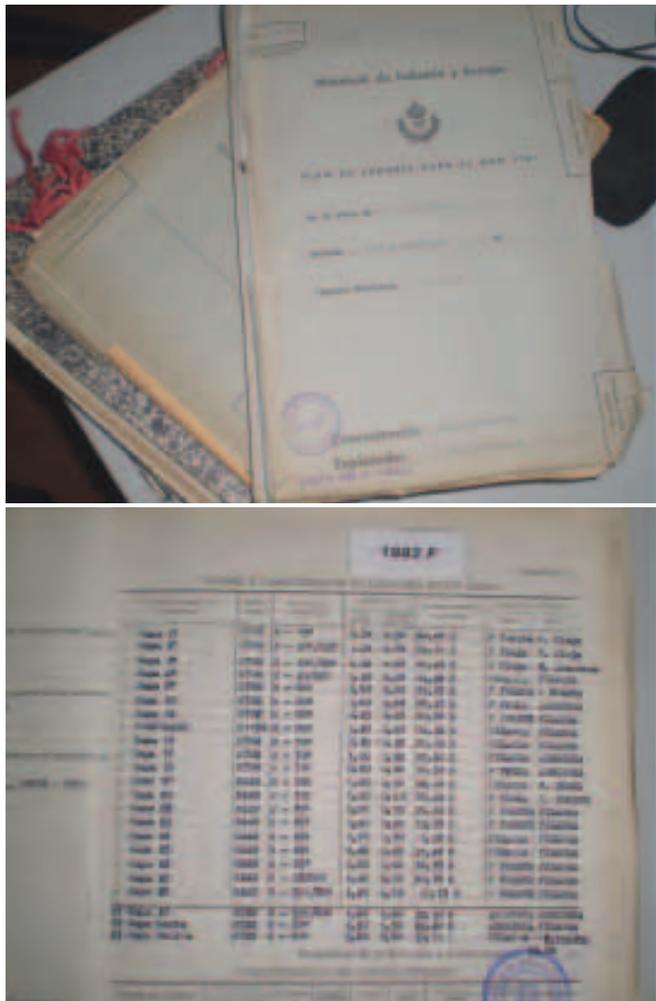


Figura 43. Planes de labores; se consultaron 23 de Barredo y 36 de Figaredo.

Una vez estimadas las toneladas de carbón extraídas tanto por relleno como por hundimiento por cada una de las plantas de los pozos Barredo y Figaredo, se obtiene el volumen extraído correspondiente (V_{ext}), multiplicando por

una densidad del carbón de $1,6 \text{ t/m}^3$ y se plantea cómo estimar el hueco final resultante (V_{res}), según el tipo de explotación. Se tienen en cuenta varias consideraciones, recogidas tanto de bibliografía especializada como a partir de la opinión de expertos, para realizar esta estimación.

1) De acuerdo con Degas et al. (2003), los huecos mineros residuales pueden estimarse según dos métodos. El primero establece, de manera empírica, una proporcionalidad entre el volumen residual y el volumen de carbón extraído; el segundo precisa un conocimiento de los volúmenes extraídos, del volumen de relleno y de hundimiento.

1a) **Cálculo del volumen de los huecos por el método de los coeficientes de capacidad de agua.** Este método empírico (Rogoz, 1978) desarrollado para la cuenca de Alta Silesia (Polonia), presenta la ventaja de prescindir del cálculo del hundimiento, muy ligado a la cantidad de medidas topográficas o la evaluación de la subsidencia. La determinación del volumen de huecos residuales se basa en la siguiente fórmula:

$$V_{res} = C \cdot V_{exp}$$

Donde:

- V_{res} = volumen total de los huecos residuales
- V_{exp} = volumen total explotado
- C = coeficiente de capacidad de agua, determinado a partir del siguiente ábaco establecido por Rogoz:

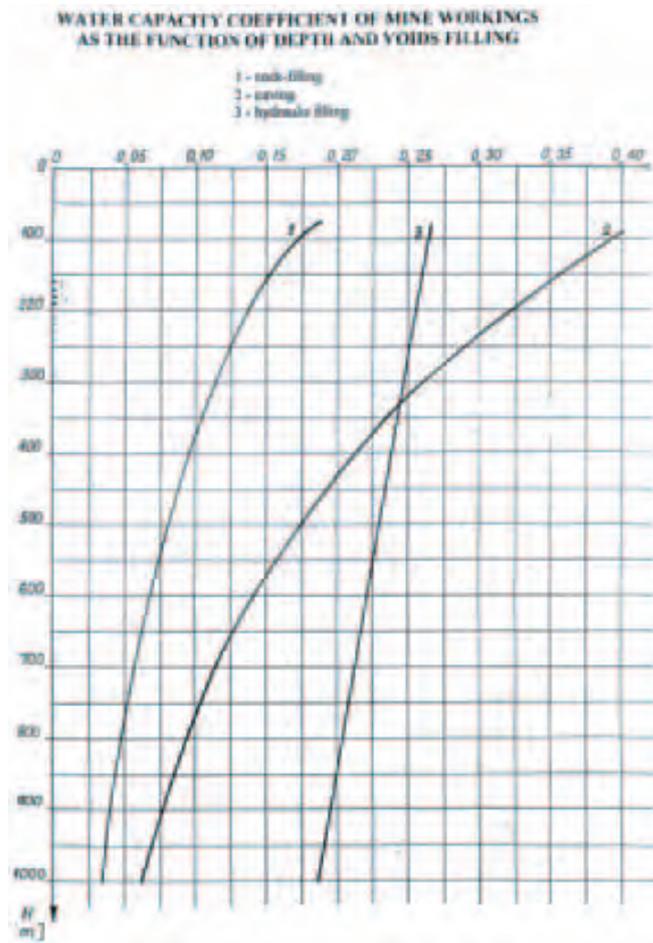


Figura 44. Coeficiente de capacidad de agua en función de la profundidad y el método de explotación (Rogoz, 1978)

Para lo concerniente al relleno hidráulico y hundimiento, los métodos de tratamiento descritos en el artículo de Rogoz (1978) parecen relativamente similares a los utilizados en Francia, lo que justifica el uso de los coeficientes deducidos del nomograma. Sin embargo la curva de relleno no hidráulico (rock-filling) da resultados muy inexactos en el caso de relleno neumático. El volumen de subsidencia (V_{sub}) resultante del método volumétrico (descrito a continuación) varía entre 0,45 y 0,65, respectivamente, para el relleno neumático y el relleno manual en capas subhorizontales. En este caso, se deduce que **el hueco residual según este método sería de un 10-15% del hueco explotado por relleno y en torno al 25% del hueco explotado por hundimiento**. Sin embargo, no se considera el método más aplicable a la zona de estudio.

1b) Cálculo del volumen de los huecos por el método volumétrico. El volumen del hueco residual inducido por los trabajos mineros (V_{res}) es consecuencia del volumen de los huecos creados por la explotación y es función, entre otros factores, del tratamiento de los talleres.

$$V_{res} = V_{ext} - (1-k_p) \cdot V_{rem} - V_{sub}$$

Donde:

V_{res} = volumen del hueco residual inducido por los trabajos mineros

V_{ext} = volumen total del material extraído, es decir el volumen total extraído de los talleres y chimeneas más el volumen de roca procedente de galerías y pozos.

V_{rem} = volumen del relleno colocado en los talleres (después del asentamiento producido por la convergencia de los hastiales). Para los talleres con hundimiento, $V_{rem} = 0$. El asentamiento de los rellenos producido por la convergencia de los hastiales se calcula mediante el coeficiente de relleno, elaborado por Proust (Proust, 1964). Este coeficiente es el utilizado en la previsión de los hundimientos y depende del tratamiento del postaller. Para un relleno hidráulico es igual a 0,3 y para un relleno neumático, igual a 0,45. Según otras fuentes (Rambaud et al., 1986): "La extracción total sin relleno ninguno (hundimiento integral), produce un hundimiento continuo del techo inmediato, dando lugar a hundimientos superficiales con factores de 0,60 a 0,95; el relleno parcial (llaves de madera) introduce poca influencia sobre el anterior con factores de 0,6 a 0,9; el relleno neumático, manual o volcado da valores entre 0,3 y 0,7, siendo el valor más normal el de 0,5 y el relleno hidráulico induce factores de hundimiento que oscilan entre 0,1 a 0,3, habiéndose obtenido valores de hasta 0,08 rellenando a presión". Luego, para un relleno calibrado de estériles de lavadero se puede tomar un coeficiente de 0,6 y para un relleno manual de avance de galerías, 0,8 y aún superior para mezcla de este relleno y llaves de madera (0,9); como en este caso se trata de rellenos manuales, a veces combinados con llaves de madera, puede

considerarse un valor medio de 0,8, es decir, $V_{rem} = 0,8 V_{ext}$.

k_p = porosidad del relleno tras el asentamiento. El relleno mantiene una cierta porosidad tras el asentamiento que se estima en un valor medio del 15%.

V_{sub} = volumen de la subsidencia (hundimiento), es decir el volumen de la cubeta de hundimiento que se ha formado en superficie.

Operando, se tiene:

$$V_{res} = V_{ext} - (1-k_p) \cdot V_{rem} - V_{sub} = V_{ext} - (1-k_p) \cdot 0,8 \cdot V_{ext} - V_{sub} = V_{ext} \cdot (0,2 + 0,8 \cdot k_p) - V_{sub}$$

$$\text{Si } k_p = 15\% : V_{res} = 0,32 \cdot V_{ext} - V_{sub}$$

El volumen de la subsidencia es el valor más difícil de determinar en este cálculo porque, contrariamente al volumen explotado y al de los rellenos, no puede determinarse a partir de los planes de explotación. Suponiéndolo en este caso despreciable o de muy baja entidad, se tiene que **el volumen de huecos residuales es aproximadamente un 30% del volumen explotado**.

En el trabajo de Degas et al. (2003) se concluye que este método volumétrico se ajusta bien a las cuencas mineras francesas y que al finalizar los desagües, el volumen de agua necesario para inundar el embalse minero es un 10% superior al hueco residual estimado. Esta diferencia revela que **al final de la explotación, el embalse minero ha adquirido una porosidad superior a la inicial, debido a la fracturación de los terrenos por la explotación**.

2) De acuerdo con la información facilitada por un experto de reconocido prestigio en mecánica de rocas (Celada, B., comunicación oral, 2009), se tiene lo siguiente: "En el caso de capas subhorizontales explotadas por hundimiento, tradicionalmente se admite que si el taller es de longitud supercrítica (que permite generar la máxima subsidencia posible) a la superficie se transmite a largo plazo el 90% de la potencia de la capa, lo cual quiere decir que en la capa explotada queda el 10% de la potencia, cifra que se debería unir al volumen de huecos. En las capas inclinadas explotadas por testers, el relleno es un todo uno vertido por gravedad, por lo que debe ser bastante compactable y se estima que el hueco que queda en la capa sería del orden del 15% de la potencia explotada. En el caso de capas inclinadas explotadas con rozadoras, el relleno está constituido por un material granular calibrado, vertido por gravedad, pero que se autocompacta en el taller al estar el frente invertido, por lo que estas explotaciones tienen el menor volumen de huecos de todas, que se puede estimar en el 5% de la potencia explotada. Finalmente, en las capas inclinadas explotadas por subniveles, el hueco se auto-rellena con el hundimiento, pero debido a los macizos de carbón que se suelen dejar, el hueco remanente debe ser muy superior al de los talleres con hundimiento en capas horizontales, estimándose en un 20% de la potencia explotada. Todas estas cifras también deberían sumarse al volumen de huecos original del terreno". En este caso, pues, **el volumen de huecos residuales se movería en torno al 15 y al 20% del hueco explotado por relleno y hundimiento, respectivamente**.

3) Finalmente, se expone la información facilitada por un experto en subsidencia minera y gran conocedor de las explotaciones asturianas de carbón (Toraño, J., comunicación oral, 2009) al respecto de este tema, se tiene: "En el caso de explotación por relleno, el hueco depende del tipo del que se trate; si es escombros de lavadero, puede ser del 10%, pero si se trata de estériles de mina (roca), anda entre el 40-50%, pudiendo llegar incluso al 0% fuese hidráulico. Estos huecos disminuyen un 30% del valor inicial al cabo de un año. En el caso de explotación por hundimiento, el hueco depende de la litología a techo; si se trata de pizarra, quedarán pocos huecos (30-40%), pero si se trata de arenisca competente, puede llegar al 60-70%. También en este caso, al cabo de un año el volumen se reducirá, siendo un 20% menor". **Aplicando lo anterior a la zona de estudio, para la parte explotada por relleno, el hueco inicial sería un 40% del total, reduciéndose un 30% tras un año, por lo que finalmente se tendría un hueco de un 28% del total. En la explotación por hundimiento, si el hueco inicial es del 40% del total, al cabo de un año sería del 32% del total.**

Teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriores y contrastando con el cálculo del volumen de agua infiltrada durante el periodo de inundación, como se verá, se ha tomado, como hueco resultante tras la explotación, un 20% del hueco original explotado por relleno y un 30% del hueco explotado por hundimiento.

Cálculo de otros huecos

Un volumen importante de huecos será aquél producido por las galerías. Para esto se han revisado los planes de labores en los que se detallaba la sección y se ha constatado que en **Barredo**, a excepción de dos, todas las secciones de las galerías que se hacen para llegar a las capas y de las guías son de **9 m²**. En cuanto a **Figaredo**, la mayoría de las secciones son de 8,98 m²: los primeros años también había bastantes de 6,62 m², pero con el tiempo fueron desapareciendo; los últimos años aparecen algunas de 12 m² para los minadores, una de 27,5 m² para una sala de baterías y algunas de 14,65 m². En definitiva, aunque aumentan algo más los últimos años (entre 9 y 14 m²), la sección que predomina es la de **8,98 m²**. Podría considerarse entonces una sección media para el conjunto Barredo-Figaredo de 9 m², pero teniendo en cuenta la disminución final del hueco hasta la estabilización de la galería, y al contrastar el volumen de huecos estimado con el de agua infiltrada, **se adopta como promedio una sección útil final de las galerías de 8 m²**. A esta sección se le multiplica por los km de galería de cada nivel, facilitados por HUNOSA.

También se han de considerar las secciones útiles de las cañas de pozo o planos inclinados y la longitud de las mismas. Como sección de la caña de pozo se ha tomado 25 m², considerando en el cálculo de huecos por tramos (entre niveles), como longitud, el espesor del tramo correspondiente.

Finalmente, se debe considerar el hueco de las zonas de embarques principales, que en el caso del conjunto

Barredo-Figaredo son una en 5ª planta del pozo Barredo y dos en 5ª y 7ª plantas del pozo Figaredo. Se estima una sección útil de 20 m² y una longitud total, incluyendo lazos de retorno, de 300 m por embarque.

Finalmente, se debe considerar el hueco de las zonas de embarques, que en el caso del conjunto Barredo-Figaredo se dividen en embarques principales, correspondientes a plantas con extracción de carbón y fuerte entrada de relleno, y embarques secundarios, correspondientes a plantas con transporte auxiliar. Para los primeros se estima una sección útil de 20 m² y una longitud total, incluyendo lazos de retorno, de 300 m, es decir, 6000 m³ por embarque principal. Para los embarques secundarios se estima una sección útil de 15 m² y una longitud total de 200 m², es decir, 3000 m³ por embarque secundario.

El cálculo detallado de los huecos del embalse minero Barredo-Figaredo (para el que se ha realizado el planteamiento de aprovechamiento térmico y energético), se recoge en la sección de resultados.

4.4 El embalse minero y el rebote del nivel piezométrico

Uno de los principales objetivos de este proyecto es la determinación del comportamiento hidrogeológico de la zona de estudio, con el objetivo de poder determinar no sólo cómo afectaría el cese del bombeo en determinados pozos a la cuenca hidrológica, sino también de poder conocer de una forma lo más aproximada posible el volumen de agua susceptible de ser aprovechado como recurso tanto hídrico como energético.

Para ello es necesario determinar en primer lugar el volumen de agua bombeado en los pozos de la zona de estudio una vez finalizada la actividad minera, para evitar la inundación de las zonas próximas. También es interesante determinar las propiedades hidrogeológicas de las formaciones permeables existentes, ya que serán éstas (junto con la porosidad inducida por las labores mineras) las que determinen la mayor o menor infiltración de agua en los pozos. El objeto es poder identificar el origen y cuantificar el agua que se infiltra a las labores y que irá rellenando los huecos una vez cesa el bombeo, así como el tiempo necesario para completarse dicha infiltración desde la superficie. Con estos datos es posible estimar el volumen del embalse subterráneo a distintas profundidades y predecir la evolución de su llenado.

4.4.1 Relación entre bombeo y recarga

Durante los últimos años HUNOSA ha venido realizando estudios para correlacionar los caudales bombeados por cada uno de los pozos con la precipitación, determinándose, por ejemplo, que en el caso de minas de montaña el tiempo medio de permanencia del agua de lluvia en las mismas está comprendido entre 4 y 10 días, recogiendo casi la totalidad del agua de lluvia caída en la superficie abarcada por la explotación (Convenio HUNOSA, 2008). En el caso de los pozos mineros ésta 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.

En el presente estudio, al no disponer de datos diarios de bombeo, como ya se ha dicho, para poder determinar el **periodo de retardo** (tiempo comprendido desde que se produce la infiltración de parte de la precipitación útil en superficie hasta que ésta es bombeada al exterior desde el interior de las labores), se ha recurrido a varios procedimientos para intentar determinarlo de la forma más fiable posible.

En el caso del pozo Figaredo, a través de la consulta de los planes de labores, se han podido recoger los días de máximo bombeo (así como el caudal bombeado) en los pozos San Vicente y San Inocencio, durante los últimos años. Comparando estos días de máximo desagüe con las puntas de lluvia útil (obtenida como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración real calculada para cada uno de los años considerados) registrada en los días anteriores, se han obtenido los periodos de retardo correspondientes. Para el caso del pozo Barredo, no se pudo disponer de datos equivalentes, pues los días de máximo bombeo anual no eran recogidos en los planes de labores correspondientes. En su lugar, se pudo disponer de datos diarios de bombeo durante cuatro meses de 2009, obtenidos a partir de las horas de funcionamiento de las cuatro bombas instaladas en dicho pozo. Las conclusiones se recogen en la sección de resultados.

4.4.2 Características hidrogeológicas de las formaciones permeables existentes

Desde el punto de vista hidrogeológico, la CCC se encuentra situada en una zona formada por materiales impermeables o muy poco permeables que, aunque pueden dar lugar a pequeños acuíferos, no dan lugar a sistemas de importancia. En particular, desde un punto de vista hidrogeológico, el entorno estudiado se enmarca dentro de la denominada 'Unidad Paleozoica', que se caracteriza por una circulación de agua de tipo fisural, dando lugar a numerosas surgencias de escasa entidad.

Los materiales presentes en la zona de trabajo incluyen lutitas, limonitas, areniscas, microconglomerados, conglomerados, calizas y capas de carbón de edad Carbonífera, y depósitos cuaternarios: aluviales, coluviones y antrópicos (escombreras, rellenos compactados, rellenos heterogéneos).

La mayor parte de las litologías que componen el sustrato rocoso (lutitas, limonitas, pizarras, etc.) presentan un carácter impermeable, lo cual hace que la circulación hídrica sea mayoritariamente a través de las discontinuidades. Las precipitaciones, dada la elevada impermeabilidad litológica, llegarían a los cauces principales por escorrentía superficial, favorecida por las elevadas pendientes, y una parte del agua de lluvia (de volumen reducido) se infiltraría a través de la red fisural (López et al., 2002).

Por tanto, se puede suponer que el embalse minero no recibe entradas de agua de acuíferos conexos, lo cual simplifica el modelo conceptual, pues la entrada de agua se vale de un flujo predominantemente vertical, por medio de la infiltración a través de los materiales fracturados.

4.4.3 El embalse subterráneo

Como ya se comentó, la explotación minera ha producido la fracturación del macizo rocoso, facilitando así la infiltración del agua procedente de la lluvia útil en la cuenca afectada por las labores. Este agua infiltrada se extrae mediante bombeo, principalmente desde las últimas plantas de cada pozo, correspondiendo los caudales bombeados durante un año hidrológico con la recarga anual aportada por la lluvia útil.

Las horas de bombeo, así como los caudales teóricos correspondientes, son conocidos en toda actividad minera subterránea por la obligatoriedad de su registro que impone el Reglamento Minero. En la CCC, donde el explotador único es la empresa pública HUNOSA, se dispone de una historia muy completa de estos datos que incluso se corresponden con aforos reales del desagüe en muchos pozos. En la Tabla 26 se recogen los volúmenes desaguados en los pozos del valle del río Turón durante el año 2007. Se observa que el desagüe total fue del orden de 7 Hm³/año.

Esta situación de bombeo permanente supone que el hueco ocupado por las labores mineras y la fracturación producida por los hundimientos y la convergencia de hastiales está siendo drenado continuamente, por lo que cabe preguntarse qué va a ocurrir ahora que cesa el bombeo permitiéndose la inundación de los pozos mineros.

Se ha comprobado que el resultado inmediato de las labores mineras es que en el seno de las formaciones geológicas del área estudiada se ha generado un "acuífero" nuevo con triple porosidad formado por una serie de redes de conductos, aisladas entre sí por niveles pizarrosos impermeables, y formadas, de menor a mayor relevancia, en primer lugar por la porosidad de los pequeños acuíferos en arenisca de un sistema multicapa de pequeña entidad, en segundo lugar por las fracturas del macizo rocoso y, en tercer lugar por la red de huecos de labores mineras, a su vez comunicados entre sí, formando el sistema "tramos litológicos permeables-labores mineras", una compleja red de conductos interconectados y que también en muchas ocasiones, por la ineficacia de los macizos de protección, conectan con la superficie (Jardón, 2008).

Durante la fase de bombeo activa, este nuevo 'acuífero' estaba desaturado y sólo había pequeñas filtraciones intermedias por conductos de baja transmisividad y de escasa entidad. Al cesar el único drenaje existente en los niveles inferiores producido por el bombeo, el nivel piezométrico se irá recuperando ("**rebote**") y el agua irá paulatinamente inundando tanto los huecos de las labores mineras como aquellos que corresponden a la "porosidad abierta" de los niveles litológicos interceptados por las labores mineras y, por tanto, conectados hidráulicamente con ellas.

El nivel de agua en este proceso de inundación ascenderá por cada conducto, más rápidamente cuanto mayor sea su conductividad hidráulica. En consecuencia, el agua normalmente se desplazará con mayor rapidez por los huecos mineros libres que por aquellos conductos relacionados con la porosidad abierta con los que cuentan los niveles litológicos permeables, en los que, como se ha dicho, el valor de este parámetro es habitualmente bajo a muy bajo y, por tanto, infiere al agua circulante importantes pérdidas de carga. Este proceso produciría primero el llenado total de las labores mineras y, transcurrido un pequeño lapso de tiempo más, la saturación de los tramos litológicos permeables conectados con dichas labores hasta donde el equilibrio hidrodinámico lo requiera (Arquer et al., 2006).

Si no se reanuda el bombeo, y alguno de los tramos litológicos citados conectados a alguna labor minera del conjunto inundado aflora a cota inferior a la boca del pozo minero, podrá llegar a producirse la correspondiente surgencia hídrica superficial (manantial), y, finalmente, si estas surgencias son incapaces de evacuar la totalidad de agua de lluvia filtrada, el agua acabará rebosando por la boca del pozo o bocaminas abandonadas.

El proceso de inundación se desarrollará con lentitud teniendo en cuenta la importante extensión lineal acumulada de las labores mineras implicadas, y, por tanto, del volumen de huecos a ocupar, en relación al valor reducido de las aportaciones hídricas respecto al volumen de hueco por unidad de altura de cota inundada. Así, si se reanuda el bombeo, y se gradúa éste de forma que su descarga (D) sea igual a la recarga (R), la altura del nivel del agua será la misma en toda la red de conductos del nuevo acuífero y se tendrá un volumen almacenado de agua equivalente al de los huecos rellenos, es decir se tendrá un **embalse subterráneo**.

Cuando ocurre que $R/D < 1$ evidentemente tiene lugar un descenso progresivo del nivel de inundación, y si sucediese que $R/D > 1$ volvería a continuar ésta. Cuando el agua de este embalse subterráneo se esté aprovechando para algún tipo de uso, supuesto un consumo anual equivalente a la recarga anual, es decir una descarga anual de equilibrio, ello no supondrá un nivel de inundación permanente, ya que en condiciones naturales, la relación R/D oscilará lógicamente por encima o por debajo de la unidad a lo largo del año en función de las fluctuaciones climáticas y las demandas, produciéndose en consecuencia oscilaciones temporales del nivel piezométrico.

4.5 Hidroquímica del agua de mina

El objetivo del estudio hidroquímico es la caracterización de las aguas de mina, de cara a su aprovechamiento posterior. En la sección de resultados se exponen las medidas de parámetros in situ (pH, conductividad eléctrica y temperatura) realizadas en muestras extraídas de la parte más superficial de la caña de los cuatro pozos del valle del Turón. También se incluyen análisis más completos de muestras de los pozos Barredo y Figaredo, que entran

dentro de los objetivos de la extensa red de calidad establecida por HUNOSA. Finalmente, se hace una discusión sobre la variación de la temperatura del agua del pozo Barredo en función del tiempo y de la profundidad, mediante la realización de perfiles térmicos.

4.6 Modelo térmico

Para entender la estructura térmica de una cuenca sedimentaria, es importante determinar algunas propiedades térmicas de los constituyentes que forman la cuenca. De todas las propiedades térmicas que forman las rocas, la conductividad térmica es probablemente la más importante en este contexto, ya que ejerce un control de primer orden en la configuración de las isotermas y del flujo de calor dentro de la cuenca.

Mediciones realizadas han demostrado que la conductividad térmica en rocas sedimentarias porosas y saturadas, varía entre 1,5 W/m·K para las pizarras y 4,5 W/m·K para las areniscas. Este rango se amplía si se tienen en cuenta los carbones y las evaporitas, con unas conductividades respectivas de 0,6 y 6,0 W/m·K. Debido a que las rocas sedimentarias son agregados porosos de fragmentos de rocas y minerales, la conductividad total dependerá tanto de la conductividad de la matriz de la roca como de la conductividad de los fluidos que rellenan los poros y por tanto de la porosidad. En cuencas sedimentarias profundas, también hay que tener en cuenta los efectos de la temperatura sobre la conductividad de la matriz y los fluidos.

No existe un modelo universal para la determinación de la conductividad térmica en rocas sedimentarias. Los modelos existentes pueden agruparse en tres tipos:

1. modelos mixtos
2. modelos empíricos
3. modelos teóricos

Los **modelos teóricos** se basan en las teorías de transferencia de calor para geometrías simplificadas. La dificultad en estos modelos es determinar el grado de simplificación para obtener una solución. Todavía existe una falta de conocimiento detallado de cómo se realiza la transferencia de calor a través de las rocas sedimentarias, y en particular, en las superficies de transición y en las interfaces grano-poro-fluido y grano-grano. Los modelos teóricos se utilizan principalmente para describir los aspectos físicos de la conducción de calor, pero aún no han sido desarrollados modelos suficientemente reales, por lo que son necesarias modificaciones empíricas de las ecuaciones.

Los **modelos mixtos** combinan valores de la conductividad térmica de la matriz (k_m) con valores de la conductividad térmica de los fluidos contenidos en los poros (k_f) en función de la porosidad. Estos modelos tienen un carácter general, pudiendo ser usados para todo tipo de sedimentos. La conductividad térmica se relaciona con parámetros físicos, con datos procedentes de testificación geofísica y con datos de laboratorio obtenidos mediante modelos empíricos. El problema de estos modelos es que

sólo pueden ser aplicados para el conjunto de rocas que esté siendo estudiado. Estos modelos mixtos dominan en los estudios recientes de la conductividad térmica. Los tres modelos mixtos más usados son:

1. el modelo de la media aritmética:

$$k = \phi k_f + (1 - \phi) \cdot k_m$$
2. el modelo de la media geométrica: $k = k_f^\phi \cdot k_m^{(1-\phi)}$
3. el modelo de la media armónica: $\frac{1}{k} = \frac{\phi}{k_f} + \frac{1-\phi}{k_m}$

Los **modelos armónico y aritmético** se basan en componentes relativos a la dirección del flujo de calor. Los valores estimados por estos dos modelos se asumen como los límites máximo (k_{max}) y mínimo (k_{min}) de la conductividad térmica de una roca o de un conjunto de rocas, por lo que son valores demasiado pesimistas, ya que la roca no podrá ser considerada idéntica a los modelos. El **modelo geométrico** da un valor intermedio entre el modelo aritmético y el armónico, por lo que es el modelo más usado, siendo el más realista de los tres, ya que es el único que tiene en cuenta el hecho de que también hay contactos grano-grano en las direcciones en las que la conductividad térmica es menor. El mayor problema del modelo geométrico es que no tiene en cuenta la textura de las muestras, por lo que sólo es válido para rocas isotrópicas.

4.6.1 Factores que afectan a la conductividad térmica

Porosidad

Se observa una clara correlación entre el decrecimiento de la porosidad y el incremento de la conductividad térmica de las rocas sedimentarias. Este efecto es debido a la baja conductividad del agua (0,6 W/m·K a 20°C), tres veces menor que la conductividad de los materiales que forman la matriz, por lo tanto, una disminución del contenido en agua en la roca podría traducirse en un incremento de la conductividad térmica de los sedimentos. Como se verá más adelante, conductividad total del material vendrá dada por la expresión:

$$k = k_m^{1-\phi} \cdot k_f^\phi$$

Donde k es la conductividad total de la muestra, k_m es la conductividad de la matriz de la roca, k_f es la conductividad del fluido contenido en los poros y ϕ es la porosidad (dada como fracción decimal).

En este estudio la porosidad se determinará a partir de la densidad total del terreno (ρ_b):

$$\phi = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m - \rho_f}$$

Donde ρ_m es la densidad de la matriz y ρ_f es la densidad del fluido. El valor de ρ_m se aproxima según la expresión:

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n PP_i \cdot \rho_i$$

Donde ρ_i es la densidad de la matriz de la i-ésima litología presente en la formación con una proporción volumétrica PP_i del n-ésimo componente de la matriz. En la siguiente tabla se incluyen las densidades para diferentes componentes de la matriz (Brigaud *et al*, 1990):

Roca matriz	Densidad (g/cm³)
Arenisca	2,65
Limonita	2,71
Dolomita	2,87
Anhidrita	2,97
Sal	2,17
Caolinita	2,1-2,7
Esmectita	2,2-2,7
Clorita	2,8
Illita	2,5-2,8
Capas mixtas	
Agua	1,0

Tabla 9. Densidades para diferentes componentes de la matriz

Mineralogía

La mineralogía es el factor más importante a controlar para determinar la conductividad térmica de las rocas sedimentarias. Como los minerales tienen diferentes conductividades térmicas, la composición de la matriz (parte sólida de la roca) va a afectar a la conductividad térmica.

Textura

Las rocas sedimentarias son rocas heterogéneas y anisótropas. La conductividad térmica variará muy poco dentro de una misma capa sedimentaria, así como con la orientación de dicha capa. El efecto de la textura sedimentaria sobre la conductividad térmica es más complejo y complicado de definir que el efecto que ejercen la mineralogía y la porosidad.

Anisotropía: una evidencia del efecto de la textura es medir la anisotropía del material. La conductividad térmica medida paralelamente a las capas ($k_{||}$) es, en ciertos casos, más de dos veces la conductividad térmica del material medida perpendicularmente a las capas (k_{\perp}). Podemos asumir tres factores que causan esta anisotropía:

1. anisotropía cristalina de cada uno de los minerales que forman la roca
2. anisotropía intrínseca o estructural resultante de la forma de los minerales y de su textura dentro de la roca.
3. orientación y geometría de las grietas, fracturas y otros defectos

La anisotropía de la conductividad térmica ($a=k_{||}/k_{\perp}$) puede ser, según estas hipótesis, función de la formación de la roca, del entorno de sedimentación y de la mineralogía de la misma, y principalmente del contenido de minerales arcillosos, ya que estos presentan la mayor anisotropía.

Tamaño de grano: se observa una correlación entre el tamaño de grano y la conductividad térmica, contemplándose un incremento de la conductividad térmica cuanto mayor es el tamaño de grano de la muestra. En un estudio realizado con muestras artificiales de cuarzo para diferentes fracciones de tamaño de grano, se observó una correlación lineal entre la conductividad térmica y el logaritmo del tamaño de grano. Una correlación similar se observó para determinadas rocas. Esto sugiere que la disminución de la conductividad térmica con el decrecimiento del tamaño de grano, se debe al aumento del número de contactos de grano por unidad de camino de flujo de calor. Para muestras no consolidadas las fracciones de tamaño de grano, pueden producir un fuerte efecto sobre la conductividad térmica, incluso mayor que la mineralogía completa.

Otros factores texturales: factores texturales, tales como el tamaño de grano, la estructura de grano, la forma del poro y el tamaño de poro, afectan a la conductividad térmica en cierta medida. Como ya se vió, el tamaño de grano influye directamente sobre la conductividad térmica, por lo que se asume que el tamaño de poro tendrá el efecto correspondiente. En realidad no existen estudios que relacionen la textura de los materiales sedimentarios con la conductividad térmica.

Temperatura y Presión

El efecto de la temperatura y de la presión sobre la conductividad térmica es ambiguo. Se sabe que la temperatura afecta a la conductividad térmica, pero cómo y en qué grado se desconoce. La conductividad térmica del agua aumenta cuando sube la temperatura, sin embargo la conductividad térmica de los minerales disminuye si aumenta la temperatura. La conductividad térmica en rocas saturadas se supone, por tanto, que varía ampliamente en función de la proporción de agua por cada parte sólida de matriz.

Si se aumenta la presión se observa que la conductividad térmica aumenta y se asume que esto es debido a una mejora de los contactos grano-grano con las altas presiones.

Una de las causas por las que hay tal desconocimiento de los efectos de la presión y la temperatura sobre la conductividad térmica, podrían ser los métodos mediante los que se determinan los cambios de volumen de las muestras. Cambios en la presión y en la temperatura inducen cambios de volumen tanto en la matriz de la muestra como en los poros. Cómo los diferentes métodos reducen estos cambios de volumen es importante en el resultado de las medidas, ya que el flujo se trasfiere a través de los contactos grano-grano. Un mayor problema derivado de altas presiones y temperaturas es el secado de las muestras.

4.6.2 Modelo de la media geométrica

En este estudio, se utilizará, para la determinación de la conductividad térmica, el modelo de la media geomé-

trica. Este modelo es adecuado para determinar la conductividad térmica de rocas sedimentarias, siempre y cuando pueda desprejarse el efecto de la anisotropía. La conductividad total, k , de un medio poroso constituido por agregados de varios materiales viene dada por:

$$k = k_m^{(1-\phi)} \cdot k_f^\phi$$

Donde k_m es la conductividad térmica de la matriz de la roca, k_f es la conductividad térmica del fluido y ϕ es la porosidad in situ. El rango típico de variación de k_f es de 1 a 6 W/m·K.

Si ponemos esta ecuación en función de la porosidad calculada a partir de la densidad total, tendremos que:

$$k = k_{m,T}^{[(\rho_b - \rho_w)/(\rho_m - \rho_w)]} \cdot k_{f,T}^{[(\rho_m - \rho_b)/(\rho_m - \rho_w)]}$$

Determinación de la conductividad de la matriz y el fluido

Suponiendo que la matriz está constituida por un agregado de m componentes minerales, k_m se calcula como la media geométrica ponderada de las conductividades de los minerales que la forman:

$$k_m = \prod_{i=1}^m k_i^{P_i}$$

Donde k_i ($i=1, \dots, m$) es la conductividad térmica de cada uno de los constituyentes (mineral o litológico) que forman la matriz de la roca y P_i su fracción volumétrica (calculada mediante microscopía óptica).

Brigaud (1989) adoptó las siguientes conductividades térmicas para algunos minerales y fluidos (Tabla 10). La sustitución directa de estos valores en la ecuación anterior permite encontrar la conductividad de la matriz en todos los niveles donde se disponga de muestras de rocas.

Tipo	Minerales	Conductividad térmica (W/m·K)
Minerales no arcillosos	Cuarzo	7,8
	Calcita	3,4
	Dolomita	5,1
	Anhidrita	6,4
	Siderita	3,0
	Ortoclasa	2,3
	Albita	2,3
	Moscovita	2,32
	Halita	6,5
Minerales arcillosos	Paligorskita	2,7
	Caolinita	2,8
	Clorita	5,1
	Illita	1,8
	Capas mixtas	1,9
Fluidos	Aire	0,03
	Agua	0,6

Tabla 10. Conductividades térmicas de minerales sedimentarios y de algunos fluidos

Resultados experimentales, muestran que la temperatura ejerce un efecto significativo sobre la conductividad térmica de los componentes de la matriz de la roca para rangos de temperatura comprendidos entre 0 y 200°C. Por lo que, la conductividad térmica calculada en laboratorio a 20°C de una roca porosa debe ser corregida para la temperatura in situ en aplicaciones de campo. Según Chapman *et al* (1984), la conductividad de la matriz es proporcional a la inversa de la su temperatura absoluta:

$$k_{m,T} = k_{m,20} \cdot \frac{293}{273 + T}$$

Donde $k_{m,T}$ es la conductividad de la matriz a la temperatura T (°C) y $k_{m,20}$ es la conductividad térmica de la matriz determinada en el laboratorio a 20°C. Esta corrección es especialmente significativa en cuencas sedimentarias profundas. Para una muestra con una conductividad medida en laboratorio (20°C) de 3,0 W/m·K y un gradiente de temperaturas medio de 25°C/km, la conductividad de la matriz in situ varía de 3,1 W/m·K en la superficie (10°C) a 2,2 W/m·K a 5 km de profundidad (135°C). La temperatura ejerce un efecto menor sobre la conductividad del fluido que sobre la de la matriz. El agua tiene una conductividad de 0,56 W/m·K a 0 °C que aumenta hasta 0,68 W/m·K a 100 °C. Una relación entre la temperatura y la conductividad del agua fue dada de forma aproximada por Kappelmeyer and Haenel (1974):

$$k_{w,T} = 0,56 + 0,003 \cdot T^{0,287} \rightarrow 0 \leq T \leq 50^\circ C$$

$$k_{w,T} = 0,442 + 0,0519 \cdot \log T \rightarrow T > 50^\circ C$$

Estas ecuaciones se usan para ajustar la conductividad térmica del agua, $k_{w,T}$, a sus condiciones de temperatura, T , a la profundidad que tenía la muestra in situ. La temperatura en función de la profundidad, z , viene dada por:

$$T(x, y, z, h) = T_0(h) + \nabla T(x, y) \cdot z$$

Donde ∇T es el gradiente de temperaturas en °C/km, y $T_0(h)$ la temperatura de la superficie del terreno en función de la elevación (h).

Tras corregir el efecto de la temperatura, la conductividad térmica in situ puede ser estimada directamente a partir de las señales de la testificación geofísica usando las ecuaciones anteriores y de los valores obtenidos mediante la testificación geofísica.

En general no se suele incluir en estos modelos el efecto de la anisotropía debido a la complejidad del problema y a que se suele carecer de datos.

4.7 Modelo hidrogeológico conceptual

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 (pudingas) 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. Según se refleja en el Inventario de puntos de agua, los caudales medidos en campo en los manantiales oscilan entre 0,05 y 4 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 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.

En la zona de estudio, 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.

Como ya se vio en apartados anteriores, la explotación del carbón genera huecos a través de las labores mineras subterráneas y las capas explotadas (hundidas o rellenas) en un sustrato inicialmente muy poco permeable, provocando 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 sis-

tema 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 15 y 45 días, como ya se ha dicho, 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.

El agua procedente de la lluvia, que en condiciones naturales circularía preferentemente como escorrentía superficial, ahora se infiltra en parte hasta llegar a los talle-

res, 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, se estima que el porcentaje medio mensual de bombeo respecto al total de precipitación recogida en la zona de estudio varía entre un 15 y un 20%. En el gráfico de la Figura 45 se comparan los valores mensuales de precipitación frente a los datos de bombeo.

Como ya se comentó, en la zona de estudio existe comunicación hídrica entre las labores del Pozo Barredo, situado en la cuenca del río Caudal y las de los pozos Figaredo, San José y Santa Bárbara, ubicados en la del río Turón. Estas conexiones pueden ser de varios tipos: a través de galerías transversales, de capas explotadas, en ocasiones denominadas "minados" o "cales por taller", o de macizos rocosos fracturados. Según el tipo de conexión la permeabilidad de la misma es mayor o menor: las galerías permiten la circulación libre del agua; las capas explotadas, que en la mayor parte de las ocasiones están hundidas o rellenas de estériles, presentan valores de conductividad hidráulica variable en función del tipo de relleno, mientras que en los macizos fracturados este parámetro tiene menor magnitud. Por lo tanto, se puede considerar que el conjunto de explotaciones mineras constituye un único sistema hídrico en el que existen vías preferenciales de circulación de agua correspondientes a las galerías y transversales, y circulación más lenta a través de los otros sistemas de conexión descrita y a través de los niveles permeables. El punto más bajo de intersección de todo el sistema hídrico con la superficie es el Pozo Barredo, que está situado sobre los materiales cuaternarios de la llanura aluvial del río Caudal, es decir, que, si se permitiese la inundación total de las labores mineras, la descarga de este sistema tendría lugar de forma natural a través de este pozo, así como a través de la base del cuaternario hacia el río.

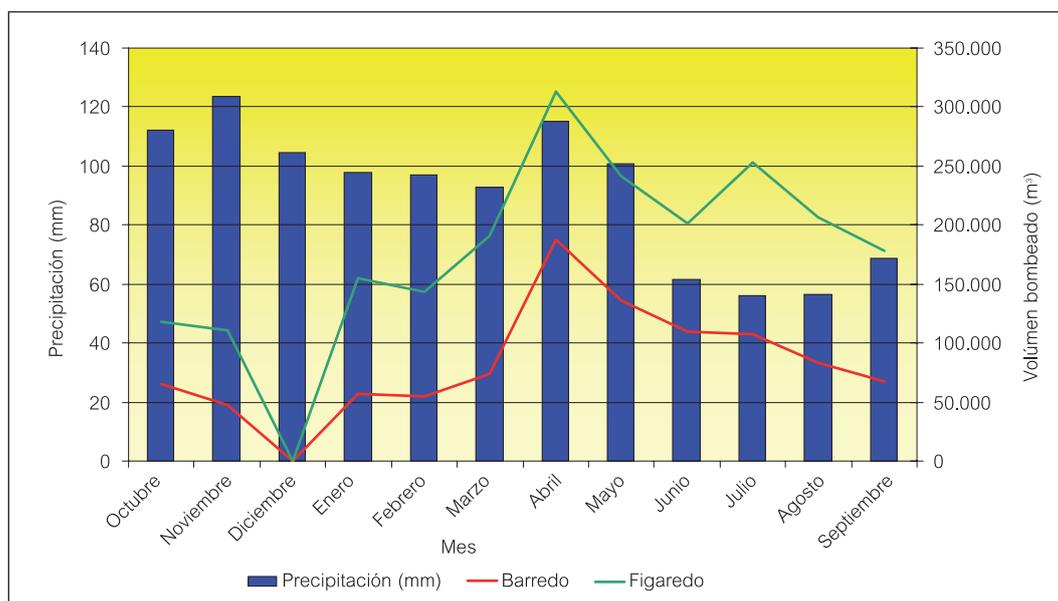


Figura 45. Comparación entre los valores mensuales de precipitación y bombeo para el año hidrológico de 2006-2007

4.7.1 Balance hídrico de la cuenca

Para realizar el balance hídrico de la cuenca se tiene en cuenta que las entradas de agua a la misma han de coincidir con las salidas, es decir (considerando que para periodos largos de tiempo no existe variación significativa en el almacenamiento):

$$\text{Precipitación} = \text{Evapotranspiración} + \text{Escorrentía superficial} + \text{Escorrentía subterránea}$$

El estudio del balance hídrico en la zona de estudio (Valle de Turón), permitirá conocer la infiltración en la zona de estudio, que corresponderá a la recarga de agua que se produce en el conjunto de pozos del Grupo HUNOSA y que hasta hace poco tiempo era captada y bombeada al exterior. Una parte de 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 (precipitación menos evapotranspiración) y la escorrentía superficial. No obstante, como se deducirá más adelante, la infiltración que reciben las labores mineras corresponde no sólo a dicha fracción de la lluvia útil, sino también a un aporte procedente de la escorrentía superficial, que en su discurrir por la superficie, percola a través de las zonas fracturadas tras la actividad minera.

Los valores medios de precipitación y evapotranspiración aplicados a la zona se estiman en el estudio climático. A partir de la información recopilada (Gutiérrez-Peina-dor, 1999), se puede concluir lo siguiente:

- En las condiciones de origen, la cuenca era prácticamente impermeable, pero la actividad minera ha generado 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.
- La permeabilidad media se estima 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.

Dado que, como se ha indicado, la cuenca objeto de estudio se encuentra fracturada debido a las labores mineras, pero está constituida por materiales prácticamente impermeables, se puede considerar que el agua bombeada de los pozos mineros es el agua infiltrada ya que no existen flujos horizontales apreciables desde posibles acuíferos conexos. Por lo tanto, partiendo de los caudales evacuados por los pozos ubicados en la zona de estudio, los valores anuales estimados para la lluvia útil y los aforos realizados del caudal del río, se puede realizar un modelo conceptual de balance hídrico para un año medio.

4.7.2 Regulación del embalse subterráneo

A partir de los datos de bombeo (infiltración), comparados con datos de consumo, se puede hacer un cálculo simplificado que determine la regulación del embalse constituido por el sistema Barredo-Figaredo.

Para ello se toman como caudales medios mensuales de aportación la suma de volúmenes bombeados al mes en ambos pozos, a partir de los cuales se hace la curva de aportaciones acumuladas para un año hidrológico medio.

4.8 Demanda de consumos domésticos, industriales y de agua caliente, calefacción y refrigeración de la zona de estudio

Recordando que uno de los objetivos del presente estudio es el aprovechamiento de las aguas de mina, principalmente del Pozo Barredo, como posible fuente de calor, es interesante conocer los potenciales clientes y sus consumos en agua, calefacción y refrigeración. Para ello, como primera aproximación, se ha realizado un estudio de las empresas y particulares presentes en la zona de estudio o que por su proximidad a la misma pudiesen ser abastecidos con el agua bombeada del Pozo Barredo, sin que la distancia al punto de abastecimiento encareciese el coste del servicio.

Como ya se mencionó, la temperatura del agua extraída del pozo Barredo permite la utilización de ésta para el suministro tanto de calefacción como de refrigeración mediante la bomba de calor, por lo que además de los posibles clientes presentes en la zona, también es interesante conocer sus consumos de agua, las calidades exigidas y su actual suministrador.

4.9 Análisis técnico-económico del aprovechamiento hídrico y energético

Se plantean las siguientes opciones de aprovechamiento:

1. Una vez clausurada la actividad de los diversos pozos mineros de la zona, y cuando el nivel piezométrico alcance la máxima cota posible (evitando riesgos de inundación indeseada), sería posible el aprovechamiento de los recursos hídricos para el mantenimiento del caudal ecológico del río Turón, así como para usos domésticos, industriales u otros. Esta alternativa es comentada en otros apartados.
2. Uso del acuífero como embalse regulador para aprovechamiento de recursos hídricos. Se trata de, una vez conocida la capacidad del 'embalse', y su comportamiento hidrogeológico, así como el volumen renovable por recarga natural, utilizarlo para la regulación de recursos, almacenando agua en épocas de exceso y extrayéndola en épocas de mayor demanda, con el consiguiente beneficio económico. Esta opción también se trata en otras secciones del documento.
3. Aprovechamiento energético del agua de mina mediante bomba de calor, la cual extrae el calor de un medio de baja temperatura estable o foco frío, y lo cede a otro medio a mayor temperatura, o foco caliente, con un consumo energético menor que la energía térmica facilitada, suponiendo un notable ahorro económico. Esta energía podría ser aprovechada para la calefacción/ refrigeración de edificios diversos de la zona.

4. Aprovechamiento hidroeléctrico del agua mediante minicentral de bombeo. Se trataría de inyectar agua en la parte superior de un pozo y turbinarla en la parte inferior, aprovechando la diferencia económica resultante de producir energía en horas punta y bombearla en horas valle. Sería necesario estimar el máximo salto posible teniendo en cuenta el almacenamiento entre bombeos, el caudal utilizable para su inyección en la 'minicentral', y los precios del kwh producido y generado, a distintas horas (valle vs punta), para realizar una valoración económica.

4.9.1 Aprovechamiento energético del agua de mina mediante bomba de calor

La bomba de calor extrae el calor de un medio de baja temperatura estable, **foco frío**, y lo cede a otro medio a mayor temperatura, **foco caliente**. Se basa en el principio por el cual se puede transmitir calor de un medio que está a menor temperatura a otro que está a temperatura superior mediante el aporte de trabajo mecánico (bombeo de calor). Este intercambio se consigue mediante el empleo de refrigerantes, que experimentan cambios de fase a una amplia gama de presiones y temperaturas. Para transportar calor desde la fuente de calor al sumidero de calor, se requiere aportar un trabajo. Teóricamente, el calor total aportado por la Bomba de Calor es el extraído de la fuente de calor más el trabajo externo aportado.

El principio de funcionamiento de las Bombas de Calor no es reciente. Sus orígenes provienen del establecimiento por Carnot en 1824, de los conceptos de ciclo y reversibilidad, y por la concepción teórica posterior de Lord Kelvin. Un gas evolucionaba cíclicamente, era comprimido y posteriormente expandido, obteniendo frío y calor. El desarrollo de los equipos de refrigeración tuvo un rápido progreso, en aplicaciones como la conservación de alimentos y el aire acondicionado. Sin embargo las posibilidades de utilizar la otra fuente térmica, el calor o el frío y calor simultáneamente no se aprovecharon (Jardón, 2008).

La mayor parte de las Bombas de Calor existentes trabajan con el ciclo de compresión de un fluido condensable. Sus principales componentes son:

- Compresor
- Válvula de expansión
- Condensador
- Evaporador

Los componentes se conectan en un circuito cerrado por el que circula un fluido refrigerante.

El ciclo se desarrolla en las siguientes etapas:

1. En el evaporador, la temperatura del fluido refrigerante se mantiene por debajo de la temperatura de la fuente de calor (foco frío), de esta manera el calor fluye de la fuente al fluido refrigerante propiciando la evaporación de éste.
2. En el compresor el vapor que sale del evaporador es comprimido elevando su presión y temperatura.
3. El vapor caliente accede al condensador. En este cambiador, el fluido cede el calor de condensación al medio.
4. Finalmente, el líquido a alta presión obtenido a la salida del condensador se expande mediante la válvula de expansión hasta alcanzar la presión y temperatura del evaporador. En este punto el fluido comienza de nuevo el ciclo accediendo al evaporador.

El compresor puede ser accionado por un motor eléctrico o por un motor térmico.

Ciertos tipos de Bombas de Calor (reversibles) son capaces de proporcionar calefacción y refrigeración. Las Bombas de Calor reversibles incorporan una válvula de 4 vías que permite la inversión de circulación del fluido frigorífico.

La siguiente ecuación permite obtener el **COP** o coeficiente de funcionamiento (*Coefficient Of Performance*), que es la cantidad de calor generado (Q_1) dividido entre la energía suministrada para operar la bomba (W). Q_2 es la cantidad de calor extraída de la fuente exterior, en este caso el agua de mina.

$$COP = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_2 + W}{W} = 1 + \frac{Q_2}{W} > 1$$

Se observa que en todo caso dicho coeficiente es mayor que uno, lo que hace especialmente atractiva la bomba de calor como elemento de calefacción, ya que a diferencia de cualquier otra máquina, la bomba de calor "produce" mas energía de la que "consume", convirtiéndola en uno de los métodos mas económicos, hasta alcanzar una reducción del 80% del coste de energía con respecto al sistema eléctrico.

El consumo energético convencional de las bombas de calor es menor que la energía térmica facilitada, y, a los precios actuales, supone un ahorro económico importante. A título de ejemplo, se expone (Figura 47) el gráfico de evolución de costes de calefacción, en el Estado de Pennsylvania (E.E.U.U.), elaborado por el U.S. Department of Energy (Watzlaf y Ackam, 2006).

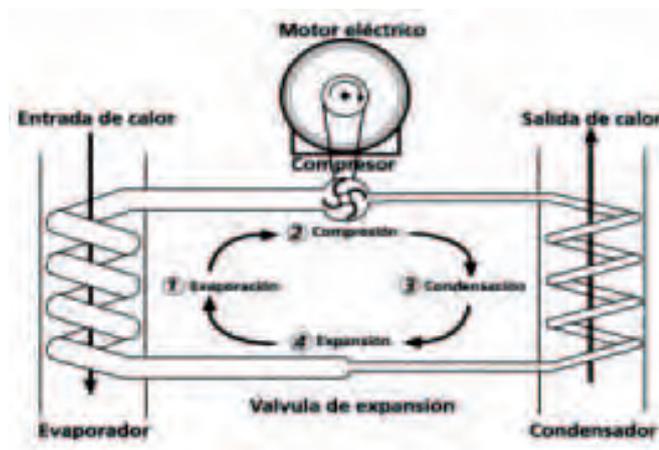


Figura 46. Esquema de la bomba de calor (Heat Pump Centre)

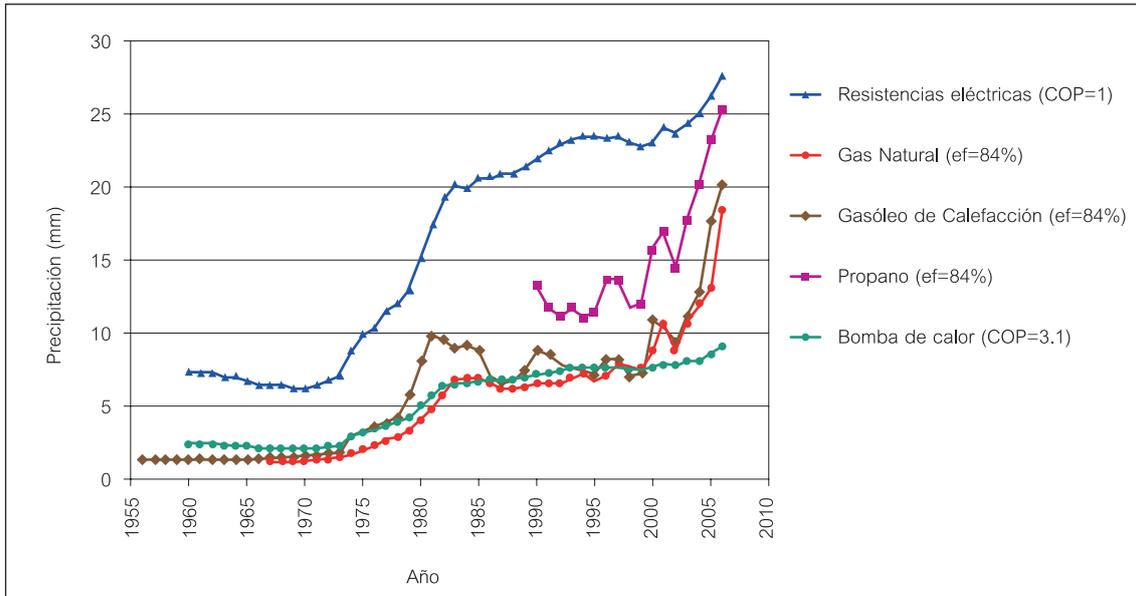


Figura 47. Evolución costes calefacción en €/GJ

4.9.2 Posibilidad de aprovechamiento mediante minicentral hidráulica

Como se ha visto en apartados anteriores, si se cesase el bombeo se formaría un embalse subterráneo en el hueco minero, cuyo nivel piezométrico variaría en función de la relación entre recarga (R) y descarga (D). Por razones de seguridad, entre otras, se establecerá que este nivel piezométrico no rebase una determinada cota, manteniendo un cierto bombeo. Existirán variaciones en la recarga, pues se produce a partir de la infiltración de parte de la lluvia útil y ésta oscila a lo largo del año, así como de la descarga, que viene dada por el también variable consumo térmico relacionado con el aprovechamiento energético de las aguas de este embalse mediante bomba de calor, ya descrito (Jardón, 2008)

Simplificando esta situación con un análisis mensual de un año natural, en cada mes i se tendrá un consumo C_i y una recarga R_i produciéndose, por tanto, una variación del volumen embalsado $C_i - R_i$. Si los consumos anuales superan la recarga, es decir si $\sum_{i=1}^{12} (C_i - R_i) > 0$, el nivel del embalse irá descendiendo, y su mantenimiento exigiría la devolución del exceso del consumo sobre la recarga (siempre y cuando la temperatura de este agua de retorno no ponga en compromiso la ulterior utilización del agua embalsada mediante bomba de calor). Pero, dada la distinta variación mensual del consumo y la recarga, también pueden producirse situaciones mensuales de rebose que exijan un análisis del nivel máximo del embalse en cada momento a fin de no sobrepasar el nivel máximo de seguridad, y situaciones de déficit que conllevarán devoluciones programadas del agua bombeada.

En esta situación hipotética, se producirá la devolución de importantes caudales al interior del embalse minero, lo cual permite la posibilidad del uso de minicentrales hidráulicas para el aprovechamiento de la energía mecánica de estos caudales devueltos tras pasar por los intercambiadores de calor. Es evidente que si además se

dispone de depósitos de almacenamiento térmico y de almacenamiento del agua bombeada se estaría en una situación ideal: consumo en horas valle y aportación a la red eléctrica en horas punta (Jardón, 2008).

Diseño de un aprovechamiento hidroeléctrico

El aprovechamiento del agua de mina en el Pozo Barrero mediante la instalación de una minicentral eléctrica tiene las características del tipo de agua fluyente, es decir, que las turbinas generan electricidad mientras les atraviese un caudal igual o superior a su mínimo técnico e interrumpen su funcionamiento cuando el caudal desciende por debajo de ese umbral.

Las principales variables a determinar para el diseño de las instalaciones y dimensionamiento de los equipos en un aprovechamiento hidroeléctrico son la altura de salto y el caudal turbinado, ya que definen la potencia de la central hidroeléctrica (IDAE, 2006).

Determinación del salto

A la vista de la figura 48, se define:

En este tipo de aprovechamiento el agua será conducida a la turbina a través de una tubería de devolución. El

- Salto bruto (H_b):** Desnivel existente entre la cota de vertido, o de devolución al embalse subterráneo y el nivel de desagüe en la turbina. En este caso, $H_b = 78,4 \text{ m}$.
- Pérdidas de carga (H_p):** Son las pérdidas por fricción del agua contra las paredes del conducto y sobre todo en la tubería forzada, más las pérdidas ocasionadas por turbulencia, al cambiar de dirección el flujo, al pasar a través de una rejilla o de una válvula, etc. Se miden como pérdidas de presión (o altura de salto) y se calculan mediante fórmulas derivadas de la dinámica de fluidos. Como primera aproximación se puede suponer que las pérdidas de carga son del orden del 5% al 10% del salto bruto (IDAE, 2006), es decir, $H_p = 5,9 \text{ m}$.

3. **Salto neto (H_n):** Es la diferencia entre el salto bruto y las pérdidas de carga producidas a lo largo de todas las conducciones. Representa la máxima energía que se podrá transformar en trabajo en el eje de la turbina. En este caso, $H_n = 72,5$ m.

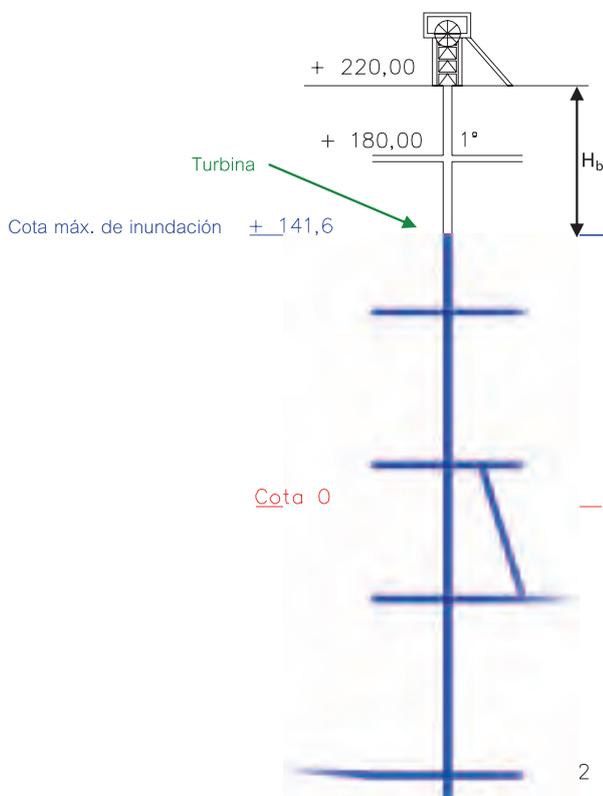


Figura 48. Esquema del salto de agua para el Pozo Barredo (cotas en m.s.n.m.)

Determinación de la carga hidráulica

La carga hidráulica, o energía por unidad de peso, contenida en un fluido incompresible que circula por el interior de un tubo, viene dada por la ecuación de Bernoulli:

$$h = H + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

En la que h es la energía total por unidad de peso, H la elevación de la línea de corriente sobre un plano de referencia, p la presión, γ el peso específico del fluido, v la velocidad de la línea de corriente y g la aceleración de la gravedad (Jardón, 2008).

En el caso de aplicación, el agua de retorno en la superficie sólo tiene energía potencial H_1 y energía cinética $v_1^2/2g$ por ser su presión igual a la atmosférica. El agua será entonces conducida a la turbina a través de una tubería de devolución. En general, se cumple que el agua hasta el punto de salida de la turbina dispone de una carga hidráulica de acuerdo con la ecuación:

$$h_1 = H_b + \frac{v_1^2}{g}$$

En la que, por unidad de tiempo, h_1 es la potencia máxima a perder por el agua, en kW. Esta potencia se disipará en vencer la fricción para poder circular por la tubería y en atravesar los álabes de la turbina.

Potencia a instalar y producción

Una minicentral hidroeléctrica cuenta con una potencia que varía en función del caudal de agua disponible para ser turbinado y el salto existente en cada instante. Para un caudal Q , se tiene una potencia útil, P_u , tal que:

$$P_u = Q \cdot H_n \cdot \gamma, \text{ siendo:}$$

$\gamma = \rho \cdot g$, donde ρ es la densidad del agua ($\approx 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) y g la aceleración de la gravedad ($\approx 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).

La expresión de la **potencia instalada** en la turbina será, pues, la siguiente:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H_n \cdot e, \text{ donde:}$$

P = Potencia en kW

Q = Caudal de equipamiento en m^3/s

H_n = Salto neto existente en metros

e = Factor de eficiencia de la central, que es igual al producto de los rendimientos de los diferentes equipos que intervienen en la producción de la energía: $e = R_t \cdot R_g \cdot R_s$

R_t = Rendimiento de la turbina

R_g = Rendimiento del generador

R_s = Rendimiento del transformador de salida

Según el tipo de equipo y el fabricante, el rendimiento de la maquinaria varía, pero a efectos de una primera aproximación, se puede tomar como factor de eficiencia para una minicentral hidroeléctrica moderna el valor de 0,85 (IDAE, 2006), con lo que la expresión anterior daría como estimación de la potencia instalada:

$$P = 8,34 \cdot Q \cdot H_n,$$

Una vez conocida la potencia es posible calcular la **producción media** de la minicentral hidroeléctrica, como producto de la potencia en cada momento por las horas de funcionamiento.

$$E = 9,81 \cdot Q \cdot H_n \cdot T \cdot e \cdot \eta, \text{ siendo}$$

E = producción de la minicentral eléctrica en kWh

T = n° de horas de funcionamiento (con H_n y Q fijos)

η = coeficiente de imponderables que refleja las pérdidas de energía debidas al mantenimiento y reparación de la central, incluso a la disponibilidad del agua y a la necesidad del mercado eléctrico.

Para la simulación del cálculo de la producción, puesto que el caudal es variable en función del tiempo, la energía se calculará en periodos de tiempo en los que el caudal pueda considerarse constante (IDAE, 2006).

El salto neto y el caudal son esenciales al definir la potencia instalada, pero también definen el tipo de turbina a instalar. En este caso, el caudal vendría determinado por el retorno de agua de aquellas aplicaciones de la bomba de calor que combinen calefacción y refrigeración y que por tanto permitan obtener un agua sobrante no demasiado enfriada como para ser devuelta al embalse sin comprometer la temperatura necesaria para el resto de aplicaciones. Para un cálculo inicial, se supondrá un caudal bajo, de $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ y el salto neto ya definido ($H_n = 72,5$ m).

4.9.3 Posibilidad de aprovechamiento del agua de mina para abastecimiento

Como ya se vio en apartados anteriores, al cesar la explotación minera surge la necesidad de seguir bombeando un caudal de agua variable, por lo que el mantenimiento de del nivel hídrico en pozos abandonados, supone un gasto para la empresa. Es por esto, que estos pozos sin explotación, que constituyen el ya definido “embalse minero”, pueden constituir un sistema de captación de agua susceptible de ser aprovechado no sólo para abastecimiento energético, si no también para abastecimiento humano e industrial. Se observa que tanto el Pozo Barredo como el Pozo Figaredo se encuentran muy próximos a núcleos urbanos, por lo que la incorporación de estos caudales a los sistemas generales de abastecimiento puede resultar económica y técnicamente viable.

5. RESULTADOS

5.1 Estudio climático

Como resultado de la metodología descrita para la realización del estudio climático, se han obtenido los siguientes mapas, que incluyen las isoyetas para los distintos años tipo (medio, seco y húmedo) cuya representación se muestra en la Figura 49, en la Figura 50 y en la Figura 51.

En las figuras 52, 53 y 54 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.

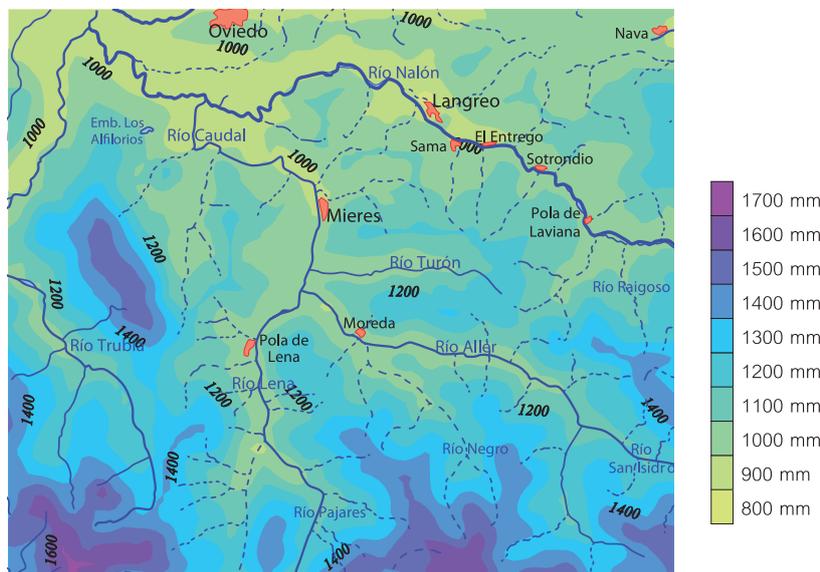


Figura 49. Isoyetas medias anuales (periodo 1970/71-2007/08)

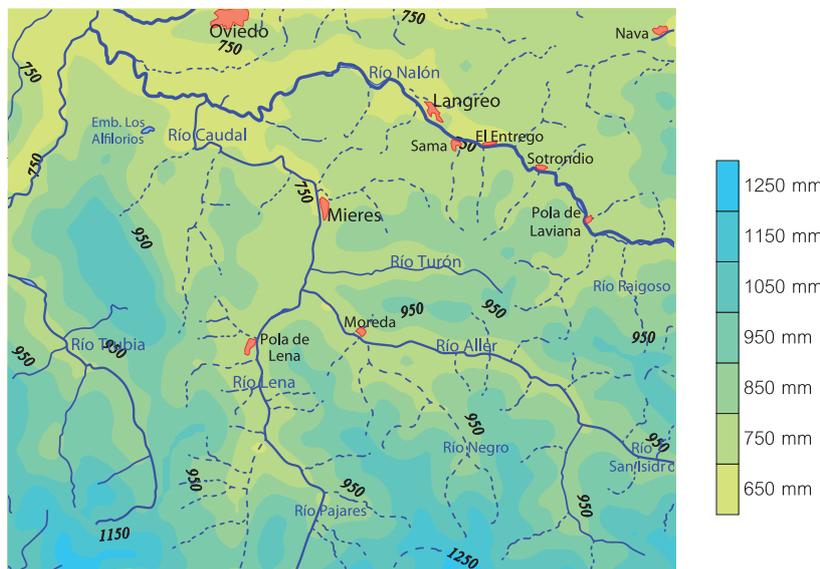


Figura 50. Isoyetas del año seco (periodo 1970/71-2007/08)

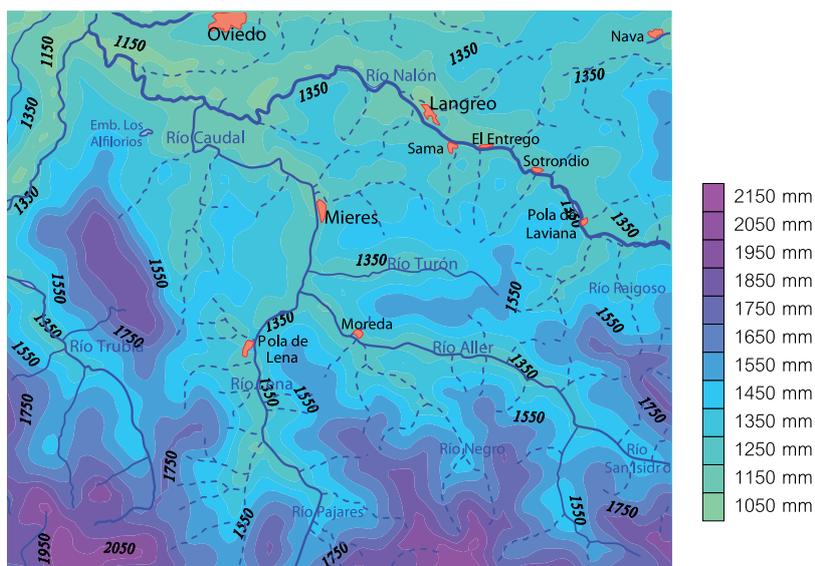


Figura 51. Isoyetas del año húmedo (periodo 1970/71 – 2007/08)

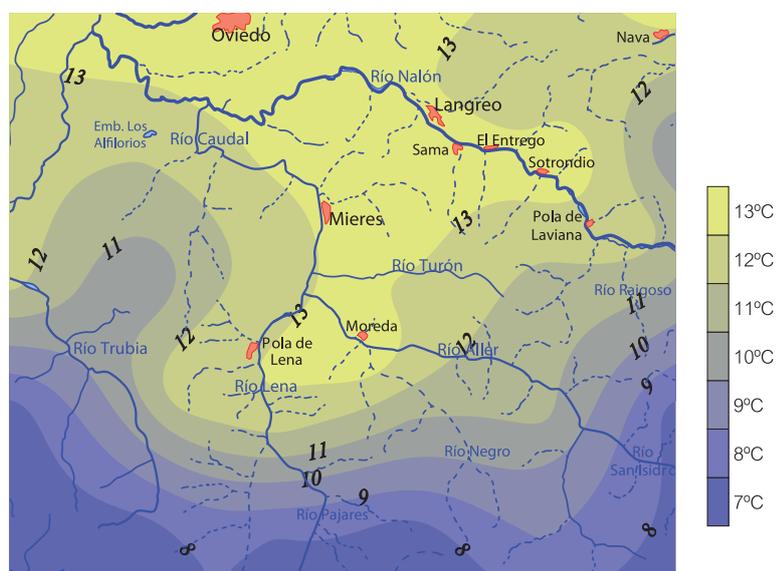


Figura 52. Isotermas medias anuales (periodo 1970/71 – 2007/08)

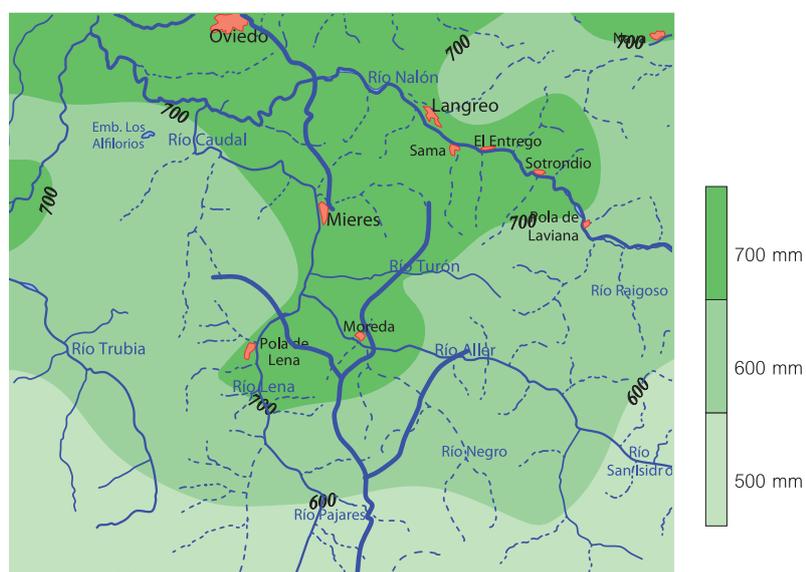


Figura 53. Evapotranspiración potencial anual (periodo 1970/71 – 2007/08)

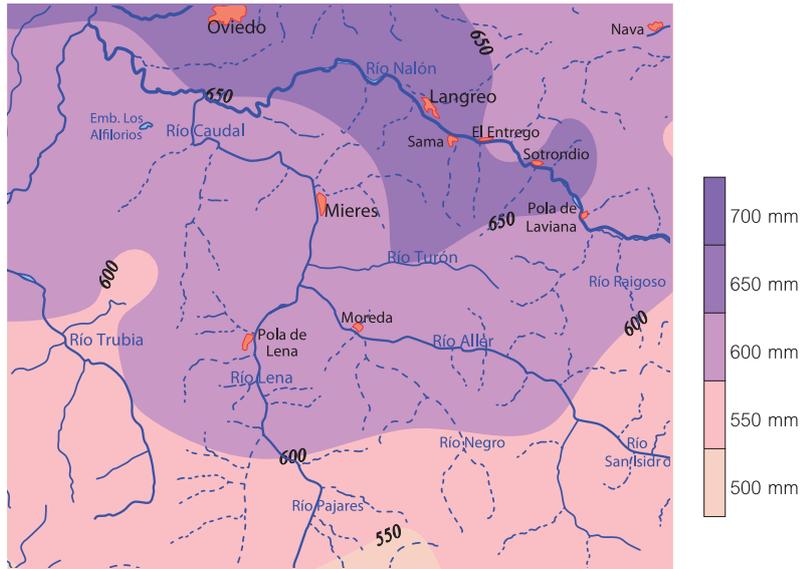


Figura 54. Evapotranspiración real anual (periodo 1970/71 – 2007/08)

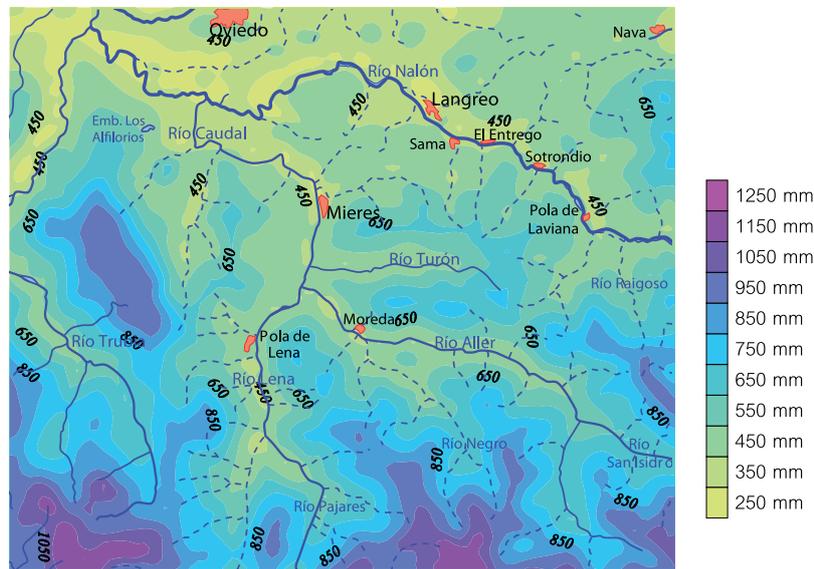


Figura 55. Isoyetas de precipitación útil anual (periodo 1970/71 – 2007/08)

En particular, a continuación, se recoge la aplicación del estudio climático a la zona del valle del Turón, para lo que se han considerado los datos registrados en la Estación Termoplumiométrica de ‘San Andrés de Mieres’, facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), por ser la estación más próxima a la zona de estudio. Esta estación se encuentra ubicada en las coordenadas UTM (279616.5 , 4788227.8) y a 340 m de altitud. De acuerdo con la metodología explicada en el apartado de estudio climático, para completar los datos faltantes de la serie de precipitaciones, se ha realizado una recta de regresión con los datos de la Estación de referencia de Santa Cruz de Mieres, relativamente próxima y con una serie más completa de datos considerados como fiables por la AEMET. El coeficiente de correlación de los datos de ambas estaciones es de 0,9.

Los valores medios mensuales y anuales (año hidrológico medio) obtenidos para el periodo de funcionamiento de la Estación de San Andrés de Mieres, una vez completados, de acuerdo con lo anterior, se recogen en la si-

guiente tabla. Se han calculado también los valores medios mensuales de evapotranspiración potencial y real, según el método de Thornthwaite, 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 1080 mm, de los cuales, se evapotranspira casi un 60%, con lo que se tiene una lluvia útil anual de 440 mm. Por otra parte, el balance hecho mes a mes, permite estimar que la reserva del suelo está llena 7 meses al año (se ha tomado un valor de 100 mm de reserva útil), mientras que existirá déficit en los meses de Julio, Agosto y 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 Noviembre a Mayo. Además, la lluvia útil es inexistente los meses de verano. Estos resultados se representan gráficamente a continuación.

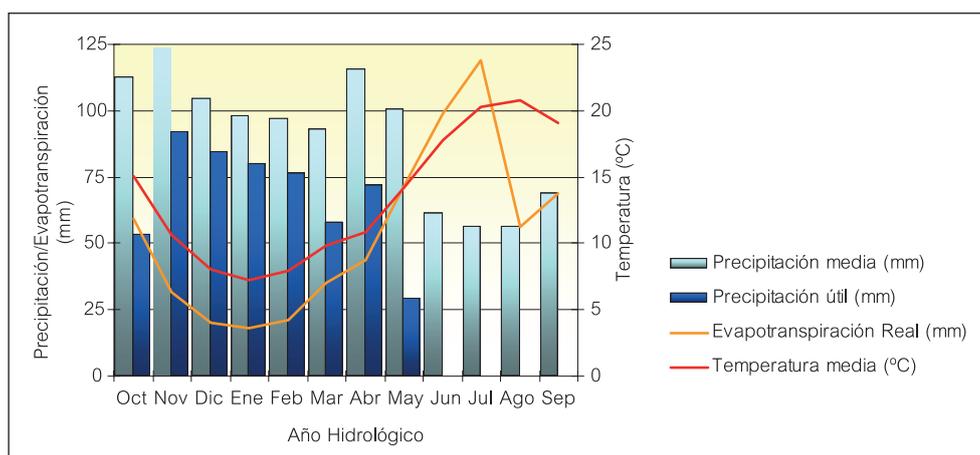


Figura 56. Variación de precipitación, temperatura y evapotranspiración real a lo largo de un año hidrológico medio en la zona de estudio

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Año
Precipitación (mm)	112,3	123,5	104,5	98,8	69,9	92,9	115,2	100,6	61,4	56,2	56,4	68,7	1086,5
Precipitación año seco(mm)	84,2	92,6	78,4	73,4	72,7	69,7	86,4	75,4	46,1	42,2	42,3	51,5	814,9
Precipitación año húmedo(mm)	140,4	154,3	130,7	122,3	121,2	116,1	144,0	125,7	76,8	70,3	70,6	85,8	1358,1
Temperatura media (°C)	15,1	10,7	8,1	7,2	7,9	9,9	10,8	14,2	17,7	20,3	20,8	19,1	13,5
Evapotranspiración Potencial (mm)	59,2	31,4	20,2	17,8	20,9	35,0	43,5	71,4	98,7	121,3	116,0	89,9	725,5
Evapotranspiración Real (mm)	59,2	31,4	20,2	17,8	20,9	35,0	43,5	71,4	98,7	118,9	56,4	68,7	642,3
Precipitación útil (mm)	53,0	92,0	84,3	80,0	76,1	57,9	71,7	29,1	0,0	0,0	0,0	0,0	444,2
Reserva (mm)	0,0	53,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	62,7	0,0	0,0	815,7
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	59,6	21,2	83,2
Superávit (mm)	0,0	45,1	84,3	80,0	76,1	57,9	71,7	29,1	0,0	0,0	0,0	0,0	444,2

Tabla 11. Valores climatológicos para un año hidrológico medio en la zona de estudio

5.2 Estudio hidrológico

5.2.1 Cálculo del caudal de máxima avenida

A) Método racional

Este método clásico permite obtener el caudal punta o de escorrentía superficial, Q_E (en m^3/s) mediante la fórmula:

$$Q_E = \frac{C \cdot I \cdot S}{3,6} \cdot k \quad \text{donde:}$$

C = Coeficiente de escorrentía o relación entre el volumen de agua de escorrentía superficial y el volumen total de agua precipitado en un determinado intervalo de tiempo (adimensional). Depende de las características del terreno y de la zona (humedad, T^a , viento, sol...) y se puede calcular mediante fórmulas empíricas o usar valores medios. En este caso, el tipo de drenaje de la cuenca considerada es en general baja permeabilidad (salvo las áreas afectadas por las labores mineras, más fracturadas).

Para el cálculo de C se empleará la fórmula del U.S. Soil Conservation Service:

$$C = \frac{(P - P_0)(P + 23P_0)}{(P + 11P_0)^2}, \quad \text{donde}$$

P : precipitación máxima diaria en el periodo de retorno considerado (mm)

P_0 : umbral de escorrentía (mm)

El parámetro P_0 , cuyo valor depende de la naturaleza del terreno, el tipo de vegetación y otros factores que faciliten la retención superficial del agua, puede estimarse mediante la tabla modificada del U.S. Soil Conservation Service (incluida en el Anexo I). El valor obtenido a partir de dicha tabla debe multiplicarse por un factor corrector regional, que para la zona norte de España (en la que se encuentra la zona de estudio) toma un valor igual a 2.

Teniendo en cuenta que en este caso, aunque hay una parte de la cuenca urbanizada, la mayor parte de ésta se puede considerar como un terreno de tipo pradera, clasificada como muy buena, con una pendiente mayor del 3%, y con un suelo de tipo C-D, el valor de P_0 según la tabla será igual a 15, que multiplicado por el correspondiente factor regional, da como resultado: $P_0 = 30$ mm.

El valor de P es el obtenido anteriormente según el método de Gumbel, por tanto, para el caso más desfavorable ($T = 500$ años), se obtiene un valor $C = 0,34$.

S = Área de la cuenca de aporte (km^2). Como ya se visto, la cuenca objeto de estudio tiene una superficie de $56,84$ km^2

k = Coeficiente corrector (adimensional); se estima igual a 1,2 (aumento del 20% en el valor del caudal, por motivos de seguridad)

I = Intensidad máxima de lluvia (mm/h). Es la máxima precipitación para una frecuencia (periodo de retorno, T) y una duración del aguacero determinados. Para su cálculo es necesario definir:

• T_c = Tiempo de concentración (h): Es el tiempo empleado por la lluvia caída en el punto más distante de la corriente de agua dentro de la cuenca para llegar hasta la salida de la misma. Se puede calcular por medio de la fórmula de Témez:

$$T_c = 0.3 \cdot \left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0.76} \quad \text{donde:}$$

L: longitud máxima recorrida por el agua (km)
 J: pendiente (tanto por uno)

A partir del mapa topográfico se obtiene $L = 9,3$ km y $J = 0,086$, con lo que se calcula $T_c = 2,6$ h.

Ahora se puede obtener la intensidad máxima para cualquier intervalo de tiempo t , aunque generalmente se tomará igual al tiempo de concentración de la cuenca, ya que si se calcula la intensidad de precipitación para un tiempo menor, no se permite que toda la cuenca contribuya al caudal y si se utiliza un tiempo superior, la intensidad máxima será menor. La intensidad de precipitación se calcula aplicando la fórmula:

$$I_t = I_d \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{\frac{28^{0.1} - 1}{28^{0.1} - 1}} \quad \text{donde}$$

I_d = Intensidad media diaria, calculada como $P_{max}/24$ (Tabla 5, apdo. 4.2.1)

I_1 = Intensidad media en la hora más lluviosa del día. En la práctica se obtiene el cociente (I_1/I_d) a partir de mapas como el publicado por MOPU (1990). Para la zona de estudio este cociente se tomará igual a 8,5.

t = Periodo de tiempo (horas) para el que se quiere evaluar la intensidad (se tomará $t = T_c = 2,6$ h)

I_t = Intensidad media en el periodo t (mm/h)

Una vez calculados los valores de I_t y conocidos el resto de parámetros (C, S y k), se obtiene el caudal de máxima avenida para cada periodo de retorno:

Periodo de retorno (años)	I_d (mm/h)	Coef. de escorrentía	I_t (mm/h)	Q_{racional} (m³/s)
2	2,0	0,09	7,2	12,9
5	2,5	0,15	12,7	36,2
10	2,9	0,19	14,4	50,5
25	3,3	0,23	16,5	70,9
50	3,6	0,25	18,1	87,5
100	3,9	0,28	19,7	105,1
200	4,3	0,31	21,3	123,7
500	4,7	0,34	23,4	149,6

Tabla 12. Caudal de máxima avenida para distintos periodos de retorno, según el Método Racional

Debe tenerse en cuenta que este método supone que la intensidad de precipitación es constante en el tiempo y homogénea en toda la superficie de la cuenca, por lo que su aplicación se restringe a cuencas pequeñas y a precipitaciones cortas y homogéneas (Sánchez, 2008).

B) Fórmula de Témez

Según este método, el caudal de máxima avenida viene dado por la expresión:

$$Q = 0,06 \cdot P_{10} \cdot A^{3/4} \cdot \log T \quad \text{donde}$$

Q = Caudal punta (m³/s)

P_{10} = Máxima precipitación diaria de periodo de retorno 10 años (mm). En este caso, $P_{10} = 68,9$ mm (obtenida anteriormente mediante un ajuste de Gumbel).

A = Superficie de la cuenca (56,84 km² en este caso)

T = Periodo de retorno para el que se quiere calcular el caudal (años)

Los resultados obtenidos aplicando este método se recogen en la siguiente tabla:

Periodo de retorno (años)	$Q_{\text{Témez}}$ (m³/s)
2	25,7
5	59,8
10	85,5
25	119,6
50	145,3
100	171,1
200	196,8
500	230,9

Tabla 13. Caudal de máxima avenida para distintos periodos de retorno, según la fórmula de Témez

Para la cuenca estudiada además de los métodos anteriormente aplicados, se ha procedido a realizar los cálculos por medio de fórmulas empíricas basadas en la superficie de la cuenca como única variable, para cada periodo de retorno y que se recogen a continuación.

C) Fórmula de Zapata

Mediante la aplicación de esta sencilla fórmula, se obtienen unos resultados de suficiente precisión.

$$Q = 7 [\log(T) + 1] S^{0.6} \quad \text{donde}$$

Q = caudal de avenida (m³/s) para un periodo de retorno T

S = superficie de la cuenca en km²

En este caso, se obtienen los resultados de la Tabla 14:

Periodo de retorno (años)	Q_{Zapata} (m³/s)
2	102,8
5	134,3
10	158,1
25	189,6
50	213,3
100	237,1
200	260,9
500	292,4

Tabla 14. Caudal de máxima avenida para distintos periodos de retorno, según la fórmula de Zapata

D) Método del PLAN HIDROLÓGICO NORTE II

Según los criterios de la Propuesta del Plan Hidrológico Norte II (CHN, 1994), se calculan los caudales de avenida conforme al gráfico siguiente, obteniendo los resultados de la que se muestra a continuación.

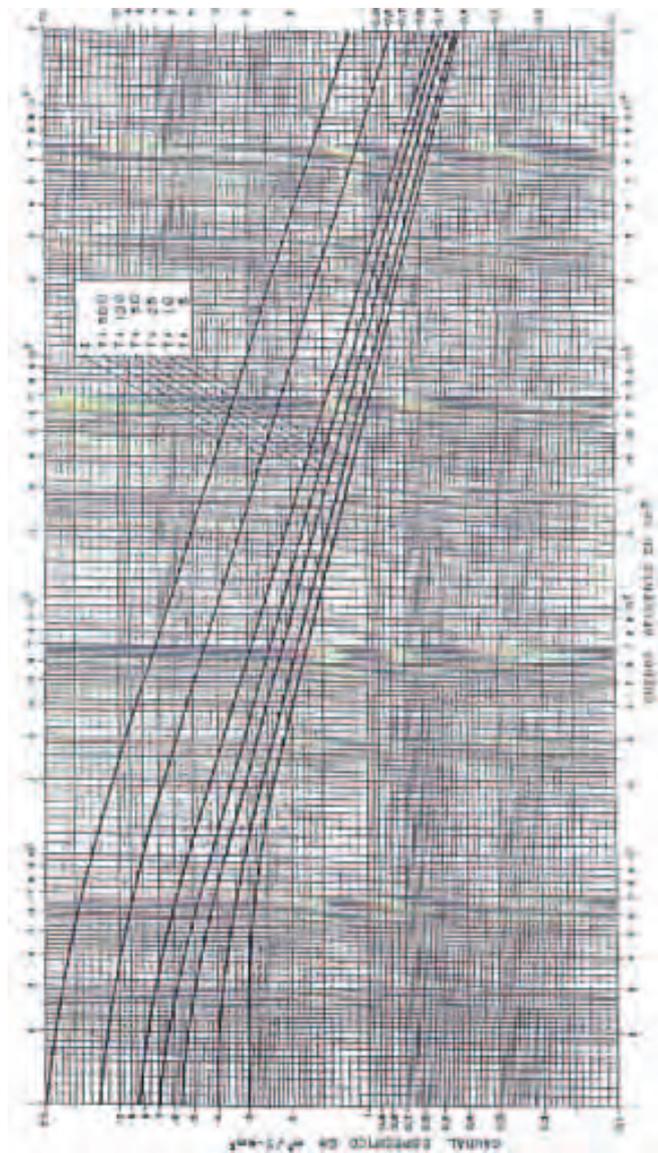


Figura 57. Caudales específicos de avenidas en función de la cuenca afluyente y del período de retorno T.

Periodo de retorno (años)	Q _{PHN II} (m³/s)
2	-
5	119,4
10	136,4
25	159,2
50	181,9
100	221,7
200	-
500	335,4

Tabla 15. Caudal de máxima avenida para varios periodos de retorno, según el Método del PHN II

E) Método de la comisaría de aguas del norte de España

De acuerdo con el criterio establecido por la C.A.N.E., se ha obtenido el caudal punta para el periodo de retorno de 500 años, mediante la siguiente fórmula:

$$Q(500) = 1,215 \cdot \left(16,8 - \frac{4,3}{S} \right) \cdot S^{(0,65 - \frac{0,4}{S})}$$

donde:

Q = caudal máximo previsible en m³/s

S = superficie de la cuenca en km²

En este caso, Q(500) = 273 m³/s.

Comparación de resultados

En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos para la cuenca objeto de estudio por los distintos métodos empleados, para cada uno de los periodos de retorno considerados.

Periodo de retorno (años)	Q _{racional} (m³/s)	Q _{Témez} (m³/s)	Q _{Zapata} (m³/s)	Q _{PHN II} (m³/s)	Q _{CANE} (m³/s)	Q _{punta} (m³/s)
2	12,9	25,7	102,8	-	-	47,2
5	36,2	59,8	134,3	119,4	-	87,4
10	50,5	85,5	158,1	136,4	-	107,6
25	70,9	119,6	189,6	159,2	-	134,8
50	87,5	145,3	213,3	181,9	-	157,0
100	105,1	171,1	237,1	221,7	-	183,7
200	123,7	196,8	260,9	-	-	193,8
500	149,6	230,9	292,4	335,4	273,0	252,1

Tabla 16. Resumen de caudales de máxima avenida obtenidos por diversos métodos para varios periodos de retorno y valores medios

Como puede verse en esta tabla resumen, los caudales punta obtenidos mediante fórmulas empíricas (Témez, Zapata, PHN II y C.A.N.E) difieren bastante de los calculados a partir del método racional, que se considera más ajustado a la realidad de la zona de estudio. Por tanto, se ha decidido tomar como valores finales los resultantes de calcular la media aritmética de los obtenidos por todos los métodos, para estar del lado de la seguridad.

Las recientes obras de encauzamiento del tramo final del río Turón, con un ensanchamiento de más de 12 m de ancho de cauce, no hacen temer por posibles desbordamientos/inundaciones tras episodios tormentosos (los cuales, como ya se ha visto, no suelen durar más de dos horas) en la parte baja del cauce. No obstante, existen áreas inundables a lo largo del cauce del río, aguas arriba de su parte canalizada, según se desprende de varios estudios anteriores (INMASA, 2007; SEINCO, 2002; Menéndez et al., 2003), por deficiencias de desagüe en puntos concretos del mismo. Tal es el caso de algún punto a la altura del pozo Santa Bárbara, donde la estrecha sección del río puede no ser suficiente para albergar la avenida de 500 años y por ello se ha planteado incluso la posibilidad de utilizar los huecos generados en el Pozo Santa Bárbara durante su explotación minera para alma-

cenar y por tanto regular el exceso de agua de escorrentía generado en episodios de máximas avenidas, cuando así se precisase, limitando el riesgo de inundabilidad aguas abajo.

5.2.2 Aforos de caudal

Los resultados de los aforos realizados mediante el método del molinete, tanto antes de la interrupción del bombeo como en el presente año, se recogen en las siguientes Tablas, donde se indica la fecha en que fueron realizados.

Como ya se ha explicado en el apartado de 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 Guardia fluvial de la zona, se procedió a la colocación de tres escalas limnimétricas en las secciones de aforo ya descritas dentro de la cuenca del río Turón. Cada una de las escalas es metálica con divisiones grabadas en cm, en colores blanco y negro, de 1 metro de longitud y una anchura de 6,3 cm (Figura 58), y fueron fijadas a la pared lateral de la sección del cauce, asegurándose su verticalidad.

Sección	Aforo:					Determinaciones in situ:					
	Fecha	Método	Sección (m ²)	Veloc. media (m/s)	Caudal (l/s)	pH	T ^a (°C)	Cond. Eléc. (uS/cm)	ORP (mV)	OD (mg/l)	Turb (ntu)
Punto 1 (La Granxa, aguas arriba Pozo Fortuna)	20-9-07	Molinete	0,98	0,142	138,45	8,65	11,07	492	176	14,3	-
	27-9-07	Molinete	0,84	0,174	146,16	8,52	11,61	501	31	-	-
	5-10-07	Molinete	0,98	0,209	203,98	8,96	12,90	461	172	0,1	-
	2-11-07	Molinete	1,30	0,184	239,20	-	-	-	-	-	-
	19-3-09	Molinete	1,46	0,400	582,40	9,27	11,80	507	-	-	-
	26-3-09	Molinete	1,17	0,360	421,20	9,07	8,46	403	440	20	-
	16-4-09	Molinete	2,16	0,705	1521,02	8,72	9,78	242	384	8,5	45
	30-4-09	Molinete	1,20	0,242	289,80	8,77	10,24	370	467	8,3	22,5
	17-6-09	Molinete	0,94	0,308	289,36	7,05	13,30	445	491	5,2	18,2
	1-7-09	Molinete	0,57	0,205	116,24	7,58	14,65	487	403	2,4	32,9
	16-7-09	Molinete	0,70	0,174	122,21	7,78	14,02	501	214	1,1	38,5
	22-9-09	Molinete	0,54	0,193	104,03	7,02	12,61	474	455	1,1	35
	16-10-09	Molinete	0,38	0,132	50,56	7,77	8,95	510	489	2,7	40,3
	19-11-09	Molinete	1,29	0,491	631,27	7,53	9,81	335	709	1,4	25,5

Tabla 17. Resultados de los aforos y mediciones de parámetros in situ realizados en el río Turón en el punto de aforo 1 (se incluyen datos históricos, además de los que se están recogiendo actualmente)

Sección	Aforo:					Determinaciones in situ:					
	Fecha	Método	Sección (m ²)	Veloc. media (m/s)	Caudal (l/s)	pH	T ^a (°C)	Cond. Eléc. (uS/cm)	ORP (mV)	OD (mg/l)	Turb (ntu)
Punto 2 (La Veguina, aguas abajo San José y Sta. Bárbara)	20-9-07	Molinete	0,95	0,324	307,80	8,44	14,8	688	164	14,6	-
	27-9-07	Molinete	1,06	0,395	418,70	8,80	14,2	657	140	-	-
	5-10-07	Molinete	0,77	0,550	421,30	8,79	15,2	613	155	0,6	-
	2-11-07	Molinete	1,06	0,326	345,56	8,64	11,8	529	203	0,1	-
	19-3-09	Molinete	2,09	0,426	890,34	8,74	14,10	909	-	-	-
	26-3-09	Molinete	1,97	0,389	766,33	8,72	11,83	840	450	20,0	-
	16-4-09	Molinete	2,90	0,613	1775,00	8,74	10,56	329	389	8,2	25
	30-4-09	Molinete	1,64	0,274	448,54	8,61	11,74	529	499	7,5	22,3
	17-6-09	Molinete	1,47	0,231	339,11	7,42	16,12	1146	508	4,0	18,2
	1-7-09	Molinete	1,13	0,267	301,60	8,09	18,46	1358	457	1,5	42,7
	16-7-09	Molinete	1,03	0,206	212,80	9,08	20,66	1554	462	1,0	22,6
	22-9-09	Molinete	0,81	0,176	143,09	7,94	15,42	622	472	0,5	142,4
	16-10-09	Molinete	1,25	0,321	400,61	7,88	17,50	2517	520	1,2	53,3
	19-11-09	Molinete	1,96	0,462	906,76	7,55	12,37	1278	472	1,2	22,9

Tabla 18. Resultados de los aforos y mediciones de parámetros in situ realizados en el río Turón en el punto de aforo 2 (se incluyen datos históricos, además de los que se están recogiendo actualmente)

Sección	Aforo:					Determinaciones in situ:					
	Fecha	Método	Sección (m ²)	Veloc. media (m/s)	Caudal (l/s)	pH	Tª (°C)	Cond. Eléc. (uS/cm)	ORP (mV)	OD (mg/l)	Turb (ntu)
Punto 3 (Peñules, aguas abajo Figaredo)	20-9-07	Molinete	2,17	0,139	302,19	7,83	16,34	866	158	12,6	-
	27-9-07	Molinete	1,70	0,212	360,61	8,57	16,10	844	92	-	-
	5-10-07	Molinete	1,63	0,212	345,56	8,72	16,17	702	151	0,8	-
	2-11-07	Molinete	1,22	0,145	176,90	-	-	-	-	-	-
	19-3-09	Molinete	4,11	0,222	910,37	8,79	15,00	948	-	-	-
	26-3-09	Molinete	3,89	0,180	700,56	8,73	12,41	850	459	15,1	-
	16-4-09	Molinete	4,71	0,369	1734,90	8,66	11,10	370	410	8,3	19,8
	30-4-09	Molinete	3,82	0,147	561,83	8,61	13,37	565	512	2,5	16,5
	17-6-09	Molinete	2,55	0,074	187,06	7,57	16,99	1104	512	4,0	15
	1-7-09	Flotador	3,37	0,090	304,00	8,45	20,56	1281	466	1,5	73,2
	16-7-09	mini-mo	2,41	0,096	247,78	8,88	19,58	1432	381	0,8	18,7
	22-9-09	mini-mo	1,85	0,062	121,88	8,13	17,87	713	494	0,4	25,6
	16-10-09	mini-mo	2,37	0,180	438,21	8,49	14,96	2172	522	1,1	212,7
	19-11-09	Molinete	3,53	0,309	1090,24	7,20	11,48	1230	521	1,4	16,7

Tabla 19. Resultados de los aforos y mediciones de parámetros in situ realizados en el río Turón en el punto de aforo 3 (se incluyen datos históricos, además de los que se están recogiendo actualmente)



Figura 58. Escalas limnimétricas colocadas en las secciones de aforo del río Turón; de izda. a dcha.: La Granxa, La Veguina y Peñule

A partir de las alturas limnimétricas registradas diariamente por residentes en la zona hasta el momento de la realización del presente informe, se ha calculado el caudal correspondiente, de acuerdo con las curvas de gastos de la Figura 59. Lógicamente, **estas curvas se irán modificando en el futuro, a medida que vayan realizando aforos puntuales para su calibración.**

Con las medidas indirectas de caudal (a partir de la altura limnimétrica), junto con las puntuales anterior y simultáneamente realizadas de forma directa, se han obtenido los siguientes hidrogramas para el periodo de aforo (Figura 60). Obviamente, éstos pueden modificarse en tanto en cuanto lo hagan las correspondientes curvas de gastos en sus posteriores calibraciones. Representado conjuntamente con la lluvia útil, se ve como el caudal se reduce en todos los casos en los meses de verano, en los que decrece la lluvia útil, dado

el alto régimen de evapotranspiración. Asimismo, la representación conjunta de los hidrogramas de las tres secciones de aforo revela una distribución a lo largo del tiempo análoga para los tres casos, coincidiendo las puntas de caudal con episodios de precipitación (Figura 61).

Sin embargo, llama la atención que **el caudal en Peñule (aguas abajo de la zona más minada de Figaredo) es en general menor que en La Veguina (aguas arriba de Figaredo). Esta diferencia queda enmascarada en los episodios tormentosos que generan puntas de caudal, pero en general corresponde a un promedio de 61 l/s, es decir, unos 5300 m³/día que son infiltrados en esta tercera subcuenca de afección de los pozos Barredo-Figaredo, más minada y por tanto más fracturada, aunque proceden de la escorrentía de las subcuencas aguas arriba de la misma.**

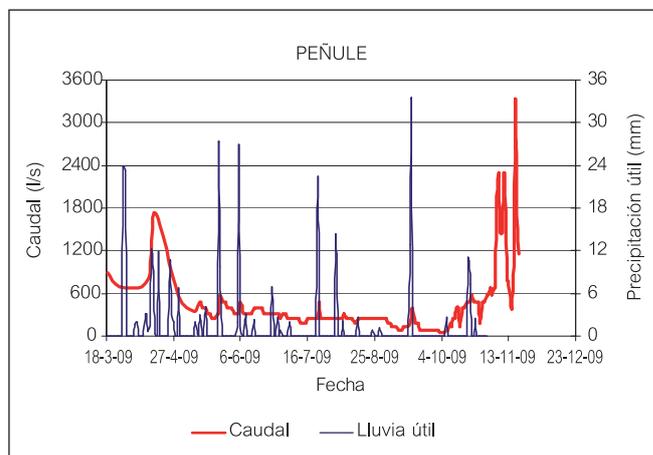
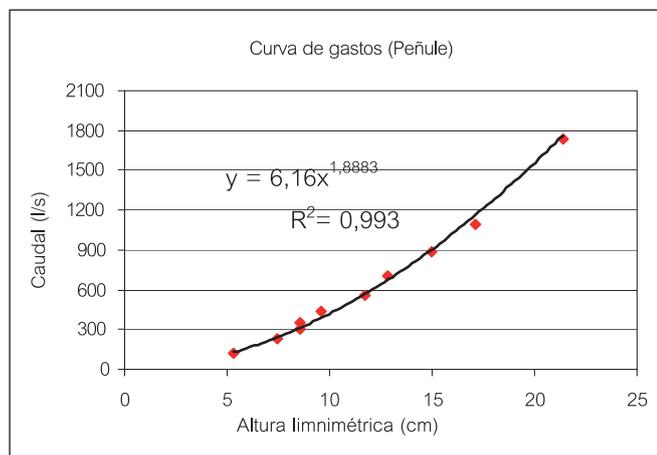
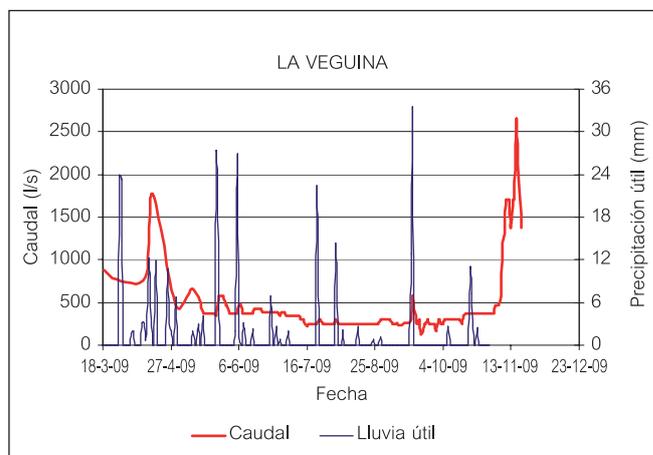
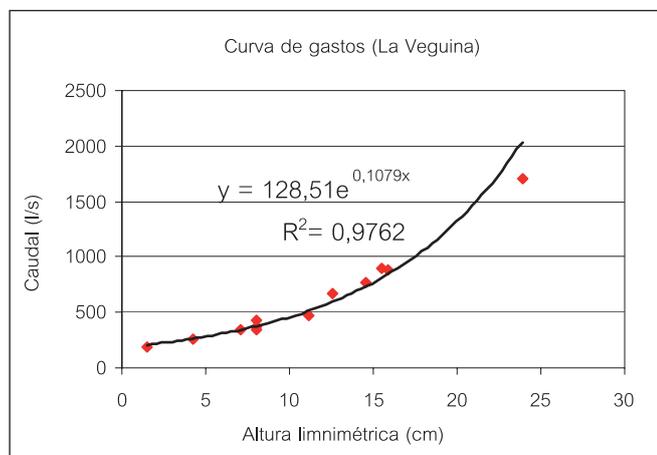
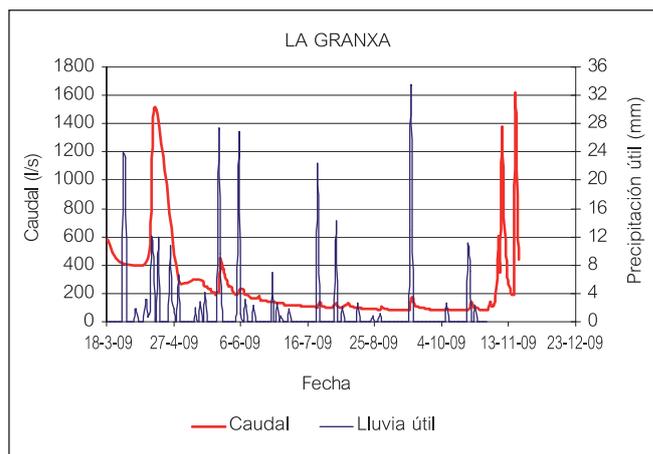
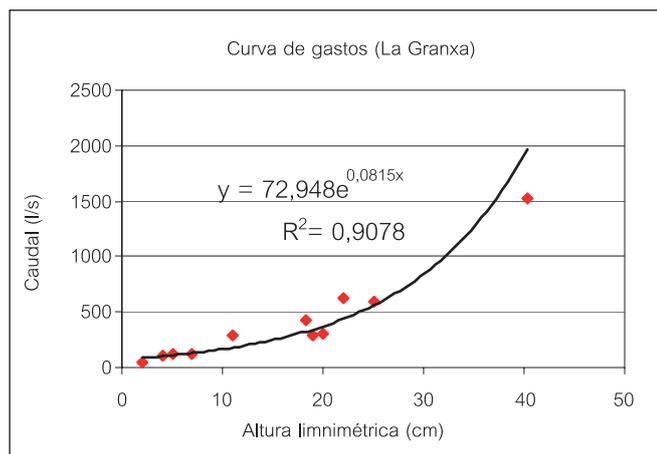


Figura 59. Curvas de gastos para las secciones de aforo de la Granxa, La Veguina y Peñule

Figura 60. Hidrogramas en las secciones de aforo de la Granxa, La Veguina y Peñule

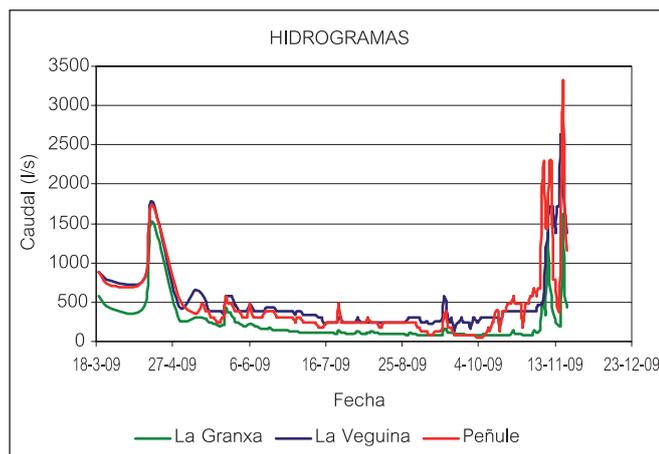


Figura 61. Representación conjunta de los hidrogramas de las tres secciones de aforo

El 10 de agosto de 2009 fue reactivado el bombeo en el Pozo San José. El agua bombeada está siendo vertida directamente al río Turón, afectando a las mediciones realizadas en los puntos de La Veguina y Peñule. El bombeo se realiza con cuatro bombas capaces de evacuar unos 200 m³/h. A partir de los datos de las horas bombeadas cada día entre el 10 de agosto y el 11 de noviembre de 2009 en dicho pozo se elaboró la gráfica de la Figura 62 en la que se representa el caudal total bombeado cada día.

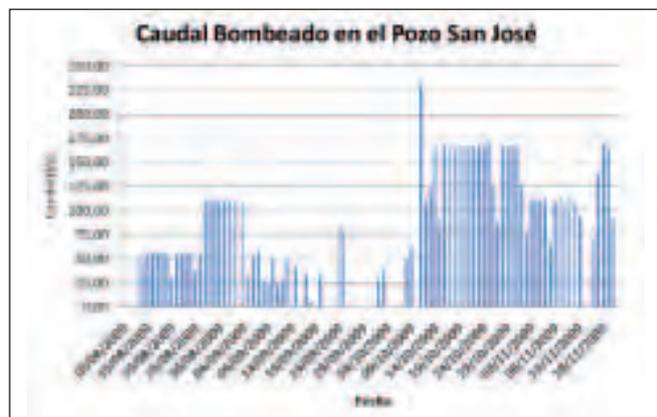


Figura 62. Caudal bombeado recientemente en el Pozo San José que es incorporado al río Turón

Como se puede ver en la figura 62, desde Agosto del presente año, el río Turón recibe entre 50 y 175 l/s los días que se bombea en el pozo San José. Dado que las horas de funcionamiento de cada bomba no son regulares, sino que su puesta en marcha es automática en función de la subida del nivel en el pozo, es imposible estimar si la lectura de la escala limnimétrica se realiza coincidiendo o no con el bombeo, por lo que es probable que algunos días (si el bombeo no fue continuo las 24 horas y la medida se realizó antes de iniciarse éste) el caudal aforado sea menor que el real.

5.2.3 Calidad de agua superficial

De las mediciones in situ realizadas, recogidas en la Tabla 17, de la Tabla 18 y de la Tabla 19, se puede deducir que el punto de aforo 1 (La Granxa) difiere claramente de los otros dos en cuanto a los parámetros analizados,

especialmente una vez reanudado el bombeo en el pozo San José, pues a partir de entonces el río aguas abajo recibe un aporte significativo de agua de mina. Los parámetros que acusan esta diferencia son sobre todo temperatura, conductividad eléctrica y turbidez, los cuales varían dentro de un pequeño intervalo en La Granxa, pero aumentan claramente en valor en Peñule y especialmente en La Veguina, más próxima al punto de vertido. En la siguiente figura se observa cómo la conductividad del río Turón puede pasar de valores en torno a los 0,5 mS/cm, aguas arriba del vertido hasta cifras 5 veces superiores tras recibir el agua de mina. Sin embargo, no se ha observado variación significativa del pH, que se mantiene en todos los casos en valores circumneutrales, ni del resto de parámetros medidos.

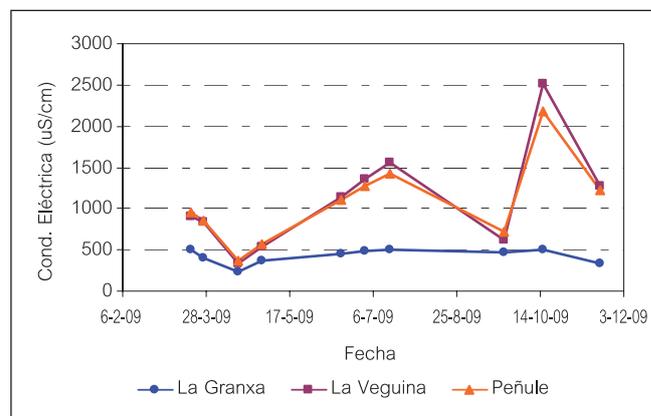


Figura 63. Varación de la conductividad eléctrica del río Turón en los tres puntos de aforo

Queda por tanto claro que el vertido de agua bombeada en los pozos al río, además de suponer un importante incremento del caudal del mismo, afecta a su calidad, incrementando su temperatura y aumentando su contenido en sólidos, tanto disueltos (relacionado con la conductividad eléctrica y la salinidad), como en suspensión (relacionado con la turbidez). De hecho, estos sólidos son apreciables en el lecho del río tras un tiempo de bombeo, aguas abajo del vertido.

5.2.4 Caudal ambiental

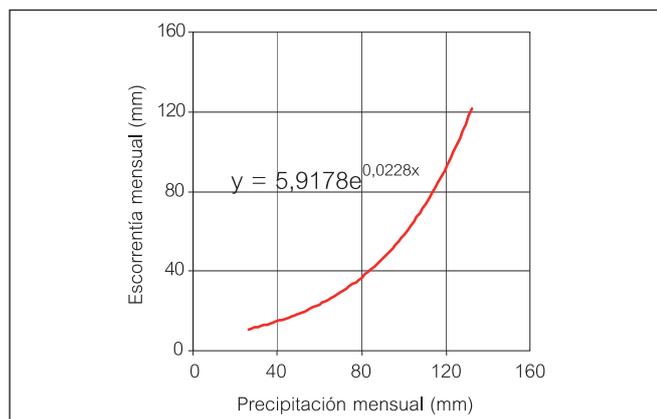
Como se ha dicho, de acuerdo con el Plan Hidrológico vigente, el caudal mínimo medio-ambiental es aquél que respetado en el cauce permite mantener en el río y su entorno unas condiciones próximas a las existentes antes de la intervención, el cual no será inferior a un décimo del caudal medio interanual, es decir, **el 10% del caudal medio del año hidrológico**. Debido a que hasta el momento no se dispone de la serie completa de aforos para un año hidrológico, no es posible determinar de manera precisa dicho caudal ambiental. Sin embargo, como aproximación, **se puede decir que el caudal ambiental estaría en torno a 70 l/s, basándose en el caudal medio que se estimará, al realizar el balance hídrico de la cuenca, en unos 700 l/s.**

Otro método de estimación del caudal medio es el que se presenta a continuación.

Coefficiente de escorrentía o de aprovechamiento

Es la relación entre el volumen de agua que corre superficialmente en un cierto tiempo y en un punto del río y el del agua precipitada en la cuenca afluente correspondiente a dicho punto. Puede tomar valores muy variables, que serán más bajos tras épocas de sequía y en terrenos permeables y más elevados en épocas húmedas y terrenos más impermeables. Análogamente, este coeficiente tomará valores superiores en años húmedos que en años secos.

Conociendo la precipitación caída sobre una cuenca y disponiendo de datos de aforos del curso de agua que la drena durante mismo periodo de tiempo, se puede establecer una relación entre precipitación y escorrentía. En el caso de la cuenca del río Turón, se ha obtenido la siguiente curva experimental, que relaciona la precipitación mensual en mm con la escorrentía también en mm de altura de agua, correspondiente a toda la extensión de la cuenca. A partir de la relación obtenida se obtiene el coeficiente de escorrentía mensual de la cuenca, considerando los valores medios de precipitación mensual en la misma.



	Precipitación media (mm)	Escorrentía (mm)	Coefficiente de escorrentía
Enero	97,8	55,0	0,56
Febrero	96,9	54,0	0,56
Marzo	92,9	49,2	0,53
Abril	115,2	81,8	0,71
Mayo	100,6	58,6	0,58
Junio	61,4	24,0	0,39
Julio	56,2	21,3	0,38
Agosto	56,4	21,4	0,38
Septiembre	68,7	28,3	0,41
Octubre	112,3	76,6	0,68
Noviembre	123,5	98,8	0,80
Diciembre	104,5	64,1	0,61
Año	1086,5	52,8	0,55

Figura 64. Relación entre precipitación y escorrentía; Obtención del coeficiente de escorrentía mensual de la cuenca

Caudal mínimo o de estiaje

Depende de muchos factores, como la precipitación en la cuenca, la infiltración, que depende a su vez de la naturaleza más o menos permeable de los terrenos, las

reservas que éstos puedan almacenar, la vegetación, etc. El caudal mínimo es diferente para cada río y también varía con los años. Se puede obtener una aproximación al caudal mínimo de un río a partir de la fórmula de Yszkowski:

$$Q = 0,0063 \cdot v \cdot \mu \cdot N \cdot F$$

en la que:

Q es el caudal mínimo en m³/s

v es el coeficiente de escorrentía anual (en este caso, se ha calculado en 0,55 en el apartado anterior)

μ es un coeficiente que varía con la naturaleza de la cuenca (para la del río Turón se toma igual a 0,8, propio de terrenos poco permeables con vegetación densa)

N es la precipitación media de la cuenca en m (en este caso N=1,086 m)

F es la extensión de la cuenca en km² (58, para la del río Turón).

Sustituyendo, se llega a un **caudal mínimo teórico para el río Turón de 174,6 l/s**, equivalente a 3,01 l/s por km² de cuenca.

Caudal medio

Su conocimiento resulta fundamental para evaluar los recursos hídricos de la cuenca y supone el límite al que se podría llegar, con una teórica regulación del río, a caudal constante. Como otros caudales característicos, varía según las condiciones del río y con los años, de acuerdo con la precipitación.

Cuando no se dispone de suficientes datos de caudal de un río, pero sí de otro de una cuenca cercana y análoga, se puede completar la serie del primero a partir de la del segundo, calculando la relación entre caudales específicos de uno y otro para el periodo coincidente en ambas series. En este caso, se ha obtenido la relación entre los caudales específicos del río Turón (a la salida de su cuenca) y el río Aller (en la estación foronómica de Moreda), a partir de los datos de aforos realizados en el primer caso y los facilitados por la Confederación Hidrográfica del Cantábrico, en el segundo.

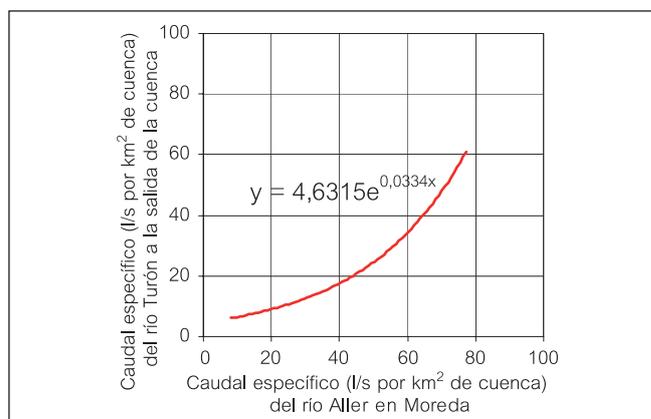


Figura 65. Correlación entre los caudales específicos de los ríos Aller y Turón

De acuerdo con esta relación, se ha podido completar la serie de datos de aforos del río Turón a partir de los de la serie del río Aller, disponible desde el año 1972-73 al 2007-08. Se ha obtenido así un caudal medio mensual de

ambos ríos (se ha preferido considerar la mediana en los cálculos de caudal mensual en lugar de la media aritmética para excluir valores extremos, lo que conduce a un valor inferior), así como **un valor medio anual, calculado en 6,72 m³/s y 698 l/s, para los ríos Aller y Turón, respectivamente**. Este último valor se recoge en la siguiente figura, en la que también se ha representado el caudal equivalente al **10% de su caudal medio anual**, valor considerado como caudal ecológico y que corresponde a **70 l/s**.

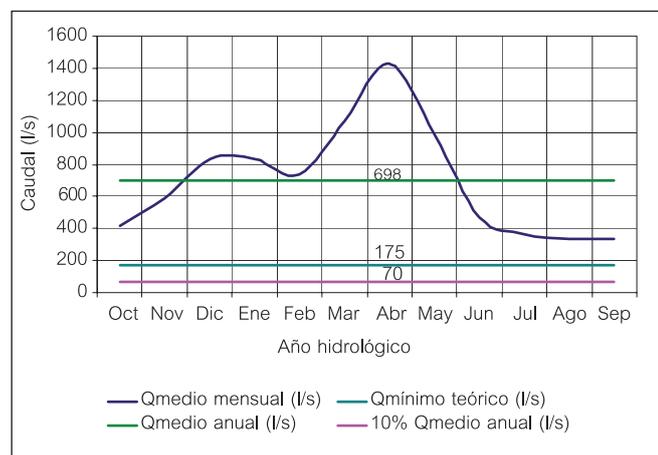


Figura 66. Estimación para un año hidrológico del caudal medio, ambiental y mínimo del río Turón

5.2.5 Inventario de puntos de agua

En la zona de estudio se inventariaron 79 puntos de agua, que incluyen 3 pozos mineros, 30 bocaminas relacionadas con galerías de minería de montaña y 48 manantiales.

Los tres pozos mineros incluidos en el inventario (Santa Bárbara, San José y Figaredo), situados todos ellos en fondos de valle, se encuentran, desde el punto de vista de explotación minera, inactivos actualmente y en proceso de inundación.

Varias de las bocaminas (galerías mineras) estaban secas en el momento de su inventario, aún así se han tenido en cuenta debido a que, según información aportada por la gente del lugar, el fuerte estiaje ha provocado un agotamiento temporal de su caudal, que habitualmente es abundante. Además, se inventariaron algunas bocaminas secas o hundidas, cuyo control podría ser interesante cuando se lleve a cabo el proceso de inundación, o en la investigación sobre el aprovechamiento del agua procedente de las labores de montaña.

De los 48 manantiales inventariados, 30 afloran en los niveles permeables constituidos por areniscas que alternan con niveles impermeables de lutitas y limonitas, y 1 en materiales carbonatados; 3 están relacionados con la actividad minera, ya que su surgencia tiene lugar ahora a través de una escombrera; y no ha sido posible identificar el origen en el resto. 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 (Convenio HUNOSA, 2008).

A continuación se muestra el mapa de ubicación de dichos puntos de agua (Figura 67) y una tabla con las principales características de los puntos de agua presentes en la zona de estudio (Tabla 20):

Nº de I.R.H.	Coordenadas U.T.M.			Nombre	T.M.	Naturaleza	Q (l/s)	Observaciones
	Longitud	Latitud	Cota (m)					
1305-5-0005	274709	4788127	261	Artoxu	Mieres	manantial		No se utiliza
1305-5-0006	274534	4787949	246	Fuente Frente al Molín II	Mieres	galería	0,31	Ganadería y agricultura
1305-5-0007	274550	4787962	340	Saburnin de Abajo	Mieres	manantial	0,15	Ganadería
1305-6-0002	278574	4789243	623	Bocamina San Víctor	Mieres	galería	1,171	Abto. a núcleos urbanos
1305-6-0003	277507	4789583	622	Fuente Parixa	Mieres	manantial	0,067	Lavadero público
1305-6-0004	280529	4790056	780	Cabornal	Mieres	manantial	0,5<Q<1	Abto. (que no sea núcleo urbano)
1305-6-0005	278659	4788693	477	Fuexo	Mieres	manantial	2,3	Abto. (que no sea núcleo urbano)
1305-6-0006	277671	4787761	206	Pozo San José	Mieres	pozo minero	117,77	Industria
1305-6-0007	279334	4788364	308	Pozo Santa Bárbara	Mieres	pozo minero	26,82	Industria
1305-6-0008	278659	4788693	477	Fuexo II	Mieres	manantial	4,02	Abto. (que no sea núcleo urbano)
1305-6-0041	276535	4788711	457	Fuente Los Valles	Mieres	manantial	2	Fuente pública
1305-6-0042	275848	4789189	457	Fuente de Vegalafonte	Mieres	manantial	3,42	Fuente pública

Nº de I.R.H.	Coordenadas U.T.M.			Nombre	T.M.	Naturaleza	Q (l/s)	Observaciones
	Longitud	Latitud	Cota (m)					
1305-6-0043	277543	4789351	584	Clavelina	Mieres	manantial	0,2	No se utiliza
1305-6-0044	278936	4790543	836	Manantial en Mina San Víctor	Mieres	manantial	0,26	Ganadería
1305-6-0045	277543	4789351	584	Bocamina Clavelina	Mieres	galería	1,9	No se utiliza
1305-6-0047	280888	4788232	394	Bocamina Podrizos II	Mieres	galería	0,977	Ganadería y agricultura
1305-6-0050	280312	4789297	581	Bocamina 7º Espinos	Mieres	galería		No se utiliza
1305-6-0053	276558	4788120	251	Bocamina 1º Santo Tomás	Mieres	galería	32,6	No se utiliza
1305-6-0055	277460	4787760	290	Bocamina 1º San José	Mieres	galería		No se utiliza
1305-6-0056	278933	4788081	354	Bocamina 2º San Pedro	Mieres	galería	0,096	Fuente pública
1305-6-0057	277502	4788495	478	La Pruvia	Mieres	galería	0,41	Fuente pública
1305-6-0058	277749	4787214	451	Bocamina 5º San Francisco	Mieres	galería	0,2	No se utiliza
1305-6-0059	280623	4790414	850	La Veguina	Mieres	manantial	0,87	Fuente pública
1305-6-0060	280819	4790084	765	Les Vahugues	Mieres	manantial	0,13	Ganadería
1305-6-0061	277704	4788392	384	Fuente Piedrafita	Mieres	manantial	0,33	Fuente pública
1305-6-0062	279771	4788373	348	Fuente Preximir	Mieres	manantial	0,6	Fuente pública
1305-6-0063	280260	4789573	665	El Llenu La Fueya	Mieres	manantial	0,78	Abto. a núcleos urbanos
1305-6-0064	280203	4789591	708	Les Barreres	Mieres	manantial	0,48	No se utiliza
1305-6-0065	280327	4789589	675	El Llenu La Fueya II	Mieres	manantial	1,8	Ganadería
1305-6-0066	280427	4789872	764	El Cabornalín	Mieres	manantial	1,13	Ganadería
1305-6-0067	281095	4790450	947	Fuente La Mofosa	Mieres	manantial	0,6	No se utiliza
1305-6-0069	279136	4789823	770	Bocamina 5º San Víctor	Mieres	galería		No se utiliza
1305-6-0070	277745	4787322	406	Bocamina 2º San Francisco	Mieres	galería		Agricultura
1305-6-0073	277348	4786722	538	Bocamina 4º San José	Mieres	galería		No se utiliza
1305-6-0076	279539	4786954	512	Bocamina 6º San Pedro	Mieres	galería		No se utiliza
1305-6-0080	278477	4786998	481	Bocamina 4º San Benigno	Mieres	galería	0,195	Ganadería
1305-6-0084	278512	4787285	415	Bocamina 3º San Benigno	Mieres	galería	0,208	Ganadería
1305-6-0085	279357	4788318	331	Bocamina La Rabaldana	Mieres	galería		No se utiliza
1305-6-0086	278238	4787759	354	Bocamina 2º San Benigno	Mieres	galería		No se utiliza
1305-6-0089	279226	4790046	876	Las Cagüernes	Mieres	manantial	0,2	Abto. a núcleos urbanos
1305-6-0093	280304	4790085	829	Quentu Polio	Mieres	manantial	0,4	Fuente pública
1305-6-0094	278103	4788040	303	Bocamina 1º San Benigno - El Cabritero	Mieres	galería	2,77	No se utiliza
1305-6-0099	280381	4788148	377	Bocamina Corrales	Mieres	galería	0,34	No se utiliza
1305-6-0101	281599	4789662	711	Fuente San Justo	Mieres	manantial	0,3	Fuente pública

Nº de I.R.H.	Coordenadas U.T.M.			Nombre	T.M.	Naturaleza	Q (l/s)	Observaciones
	Longitud	Latitud	Cota (m)					
1305-6-0103	281021	4788837	617	Bocamina Brañadiello	Mieres	galería	0,34	No se utiliza
1305-6-0105	280295	4789125	569	La Sienda	Mieres	manantial	0,18	Abto. y ganadería
1305-6-0106	277849	4789018	581	El Fontico	Mieres	manantial	0,14	Fuente pública
1305-6-0107	277619	4789080	539	El Molín	Mieres	manantial	0,2	Fuente pública
1305-6-0108	277231	4788087	296	Fuente de Villabazal	Mieres	manantial	0,07	Fuente pública
1305-6-0109	277934	4787863	310	Fuente Villapendi	Mieres	manantial	0,06	Fuente pública
1305-6-0110	278232	4787146	480	Fuente Tablao	Mieres	manantial		Fuente pública
1305-6-0111	280342	4788501	452	Bocamina 3º Espinos-La Faya	Mieres	galería	<0,05	No se utiliza
1305-6-0112	280587	4789663	651	Bocamina 9º Espinos	Mieres	galería		Ganadería
1305-6-0113	280579	4789556	651	El Gurbiciosu	Mieres	manantial	0,05	No se utiliza
1305-6-0114	277193	4788291	389	El Candil - La Caba	Mieres	manantial		Fuente pública
1305-6-0115	279322	4787509	440	4º de San Pedro	Mieres	manantial	0,09	Abto. (que no sea núcleo urbano)
1305-6-0116	279297	4787600	438	Bocamina 4º San Pedro	Mieres	galería	3<Q<6	No se utiliza
1305-6-0117	280035	4788234	359	Bocamina de San Andrés	Mieres	galería	0,5	No se utiliza
1305-6-0118	280792	4788192	367	Fuente Podrizos	Mieres	manantial	2,6	Fuente pública
1305-6-0119	280981	4788216	371	Bocamina Podrizos I	Mieres	galería		No se utiliza
1305-6-0120	276182	4789319	626	Bocamina Espines	Mieres	galería	0,059	Ganadería
1305-6-0121	275407	4788068	251	Pozo Figaredo (San Vicente)	Mieres	pozo minero	86,05	No se utiliza
1305-7-0043	283439	4787844	521	Fuente de Los Serrones	Mieres	manantial		Fuente pública
1305-7-0044	283257	4788183	499	La Valeriana (La Argallá)	Mieres	manantial	0,05	Fuente pública
1305-7-0045	283493	4788792	607	Les Tzaes (Urbiés)	Mieres	manantial	0,15	Fuente pública
1305-7-0046	283236	4788711	516	Fuente La Colorá	Mieres	manantial	0,07	No se utiliza
1305-7-0047	283236	4788711	516	Fuente El Corral d'Uxu	Mieres	manantial	0,3	Fuente pública
1305-7-0048	283955	4788568	675	La Lláscara	Mieres	manantial		Fuente pública
1305-7-0049	284026	4788579	663	Parador El Cruce	Mieres	manantial		Abto. (que no sea núcleo urbano)
1305-7-0050	284265	4788532	660	Les Matielles	Mieres	manantial		Fuente pública
1305-7-0051	284370	4788293	593	El Pedreru	Mieres	manantial	0,05	Fuente pública
1305-7-0052	285619	4788031	594	El Llanu La Reguera	Mieres	manantial	0,28	Abto. (que no sea núcleo urbano)
1305-7-0053	285279	4788052	651	Fuente El Dochal	Mieres	manantial	0,097	Fuente pública
1305-7-0054	283821	4788301	576	Santa Olaya	Mieres	manantial	0,07	Fuente pública
1305-7-0055	284613	4788545	644	La Llomba	Mieres	manantial		Fuente pública
1305-7-0056	285251	4787756	574	Bocamina El Molinón	Mieres	galería	55,6	No se utiliza
1305-7-0057	285437	4787365	637	Bocamina El Mosquil	Mieres	galería	4,7	No se utiliza
1305-7-0058	286006	4786981	796	Mayao Carril	Mieres	manantial		Fuente pública
1305-7-0059	285251	4787756	574	Bocamina Urbiés	Mieres	galería	>50	Abto. (que no sea núcleo urbano)

Tabla 20. Puntos de agua inventariados



Figura 67. Mapa de puntos de agua

5.3 Cubicación de volúmenes de huecos

Como ya se ha explicado en la sección 4, a partir de la consulta de los planes de labores de los pozos Barredo y Figaredo, se ha obtenido el tonelaje de carbón extraído por relleno y hundimiento para cada nivel de ambos pozos.

El carbón explotado y contabilizado ha sido extraído en dos ramas del Sinclinal de Barredo, una subvertical y otra tumbada o muy tumbada ($\leq 40^\circ$). Esto en la práctica minera significa que parte del tonelaje se ha extraído rellenando posteriormente los huecos (relleno) y parte con hundimiento libre o controlado mediante llaves de madera o cámaras y pilares (hundimiento). En las Tabla 21 y Tabla 22 se recogen las toneladas de carbón extraídas por cada nivel en ambos pozos, especificando si estas fueron extraídas por relleno o por hundimiento. En el caso del Pozo Barredo, los niveles se corresponden con las plantas de la mina. Para Figaredo, los niveles se corresponden con las plantas de San Inocencio, estando todo San Vicente incluido en el llamado nivel 1. Se consideró, en ambos casos, que por cada nivel únicamente se extraían las toneladas ubicadas entre este nivel y el superior.

Nivel	Arranque	
	Relleno	Hundimiento
1	62.010	3.748
2	11.8211	167.268
3	1.017.137	571.589
4	2.112.999	457.385
5	420.127	692.878
TOTAL	3.730.484	1.892.868

Tabla 21. Toneladas de carbón extraídas por relleno y hundimiento en el Pozo Barredo

Nivel	Arranque	
	Relleno	Hundimiento
1	1.043.983	51.389
2	573.828	36.756
3	797.000	48.733
4	637.818	30.165
5	3.352.659	31.308
6	2.540.990	149.123
7	1.773.575	102.068
8	1.233.302	4.273
9	287.878	
10	200.804	
TOTAL	12.441.836	453.815

Tabla 22. Toneladas de carbón extraídas por relleno y hundimiento en el Pozo Figaredo

Teniendo en cuenta que el hueco útil será el resultante de multiplicar el volumen deshulado por los coeficientes que suponen la reducción porcentual del hueco inicial abierto. Como ya se ha justificado, se proponen como coeficientes de reducción de 0,2 para la explotación con relleno y 0,3 para la explotación con hundimiento. A partir de estas toneladas arrancadas y teniendo en cuenta la densidad del carbón, que, como ya se ha dicho, se toma como 1,6 t/m³, es posible calcular el volumen dejado por las toneladas deshuladas.

Como ya se ha explicado, a estos huecos se les suman los correspondientes a las galerías (sección media considerando convergencia de 8 m², que se multiplica por los km de galería en cada planta). Las galerías tienen una longitud total de 400 km, desglosada por niveles en la Tabla 23.

Longitud galerías				
Figaredo		Barredo		Total
Planta	Km	Planta	Km	Km
1ª	33,5	1ª	24,5	58,0
2ª	34,7	2ª	29,4	64,1
3ª	40,0	3ª	52,8	92,8
4ª	31,6	4ª	29,5	61,1
5ª	34,7	5ª	11,8	46,4
6ª	33,7			33,7
7ª	26,2			26,2
8ª	15,8			15,8
9ª	2,2			2,2
10ª	1,3			1,3
TOTAL	254	TOTAL	147,9	401

Tabla 23. Longitud de galerías abiertas en los pozos Barredo-Figaredo.

Cabe hacer notar que los valores definitivos de los coeficientes para hueco residual de relleno y hundimiento, así como de la sección de galería, han sido definidos (variando entre una pequeña horquilla de valores, como se explica en el apartado 4.3.3), al ajustar el volumen de huecos así definido al volumen de agua infiltrada (que por tanto ha rellenado dichos huecos).

Como ya se ha dicho, el hueco dejado por las cañas de los pozos se calcula multiplicando su longitud (espesor de cada tramo entre niveles considerado) por una sección útil de 25 m². Finalmente, los embarques principales son ocho en Figaredo (3ª, 4ª y 5ª planta de San Vicente, 7ª de San Vicente-3ª de San Inocencio, 8ª de San Vicente-4ª de San Inocencio y 7ª San Inocencio), sumando en total unos 48.000 m³ y dos en Barredo (3ª y 5ª planta), que suman unos 12.000 m³. Los embarques secundarios son 12 en Figaredo (1ª, 2ª, 6ª, 10ª y 11ª plantas de San Vicente y 1ª, 2ª, 5ª, 6ª, 8ª, 9ª y 10ª de San Inocencio), que suman en total 36000 m³ y tres en Barredo (1ª, 2ª y 4ª planta), que en conjunto suponen 9000 m³.

Los cálculos detallados para la estimación de huecos de Barredo y de Figaredo, se muestran en las tres tablas siguientes. También se ha calculado el volumen de hueco por m vertical, que facilitará su representación gráfica, así como el volumen acumulado de ambos pozos, metro a metro. **Hay que destacar que la estimación de los huecos es imprecisa (subestimada) en las plantas superiores de ambos pozos, puesto que no se pudo acceder a los planes de labores más antiguos y por tanto no se ha contabilizado su producción.**

Barredo Tramo	Cota sup. (msnm)	Cota inf. (msnm)	Espesor (m)	t extraídas según planes de labores			Volumen deshulado (m ³)		
				Relleno	Hundimiento	Total	Relleno	Hundimiento	Total
Superficie-Planta 1	220	183,2	36,8	62,010	3,748	65,758	37,582	2,271	39,853
Planta 1	183,2	180,7	2,5						
Planta 1-Planta 2	180,7	103,2	77,5	118,211	167,268	285,479	71,643	101,374	173,017
Planta 2	103,2	100,7	2,5						
Planta 2-Planta 3	100,7	20,2	80,5	1,017,137	571,589	1,588,726	616,447	346,417	962,864
Planta 3	20,2	17,7	2,5						
Planta 3-Planta 4	17,7	-47,5	65,2	2,112,999	457,385	2,570,384	1,280,605	277,203	1,557,809
Planta 4	-47,5	-50	2,5						
Planta 4-Planta 5	-50	-139,5	89,5	420,127	692,878	1,113,005	254,622	419,926	674,549
Planta 5	-139,5	-142	2,5						
Total				3,730,484	1,892,868	5,623,352	2,260,899	1,147,193	3,408,092

Barredo Tramo	(Km de galería)	Hueco útil (m ³)						Hueco (m ³) por m vertical
		Relleno	Hundimiento	Galerías	Caña pozo	Embarques	Total	
Superficie-Planta 1		3,758	454		920		5,132	139
Planta 1	24,5			195,879	63	3,000	189,941	79,577
Planta 1-Planta 2		7,164	20,275		1,938		29,377	379
Planta 2	29,4			235,168	63	3,000	238,231	95,292
Planta 2-Planta 3		61,645	69,283		2,013		132,941	1,651
Planta 3	52,8			422,183	63	6,000	428,246	171,298
Planta 3-Planta 4		128,061	55,441		1,630		185,131	2,839
Planta 4	29,5			236,128	63	3,000	239,191	95,676
Planta 4-Planta 5		25,462	83,985		2,238		111,658	1,248
Planta 5	11,8			94,022	63	6,000	100,085	40,034
Total	147,9	226,090	229,438,5	1,183,381	9,050	21,000	1,668,959	

Tabla 24. Cálculos para estimación de volúmenes de huecos de Barredo

Figaredo Tramo	Cota sup. (msnm)	Cota inf. (msnm)	Espesor (m)	t extraídas según planes de labores			Volumen deshullado (m³)		
				Relleno	Hundimiento	Total	Relleno	Hundimiento	Total
Superficie-Planta 1	278,7	78,84	199,9	1,043,983	51,389	1,095,372	632,717	31,145	663,862
Planta 1	78,84	76,34	2,5						
Planta 1-Planta 2	76,34	25,94	50,4	573,828	36,756	610,584	347,774	22,277	370,051
Planta 2	25,94	23,44	2,5						
Planta 2-Planta 3	23,44	-26,15	49,6	797,000	48,733	845,733	483,031	29,535	512,566
Planta 3	-26,15	-28,65	2,5						
Planta 3-Planta 4	-28,65	-79,4	50,8	637,818	30,165	667,983	386,556	18,282	404,838
Planta 4	-79,4	-81,9	2,5						
Planta 4-Planta 5	-81,9	-132,54	50,6	3,352,658	31,307	3,383,966	2,031,914	18,974	2,050,888
Planta 5	-132,54	-135,04	2,5						
Planta 5-Planta 6	-135,04	-185,82	50,8	2,540,990	149,123	2,690,113	1,539,994	90,377	1,630,371
Planta 6	-185,82	-188,32	2,5						
Planta 6-Planta 7	-188,32	-239,17	50,9	1,773,575	102,068	1,875,643	1,074,894	61,860	1,136,754
Planta 7	-239,17	-241,67	2,5						
Planta 7-Planta 8	-241,67	-292,22	50,6	1,233,302	4,273	1,237,575	747,456	2,590	750,046
Planta 8	-292,22	-294,72	2,5						
Planta 8-Planta 9	-294,72	-338,74	44,0	287,878		287,878	174,472		174,472
Planta 9	-338,74	-341,24	2,5						
Planta 9-Planta 10	-341,24	-391,98	50,7	200,804		200,804	121,699		121,699
Planta 10	-391,98	-394,48	2,5						
Total				12,441,836	453,815	12,895,651	7,540,507	275,039	7,815,546

Barredo Tramo	(Km de galería)	Hueco útil (m³)						Hueco (m³) por m vertical
		Relleno	Hundimiento	Galerías	Caña pozo	Embarques	Total	
Superficie-Planta 1		63,272	6,229		4,997	24,000	98,497	493
Planta 1	33,5			268,142	63	6,000	274,204	109,682
Planta 1-Planta 2		34,777	4,455		1,260		40,493	803
Planta 2	34,7			277,263	63	3,000	280,326	112,130
Planta 2-Planta 3		48,303	5,907		1,240		55,450	1,118
Planta 3	40,0			320,248	63	6,000	326,310	130,524
Planta 3-Planta 4		38,656	3,656		1,269		43,581	859
Planta 4	31,6			252,516	63	6,000	258,578	103,431
Planta 4-Planta 5		203,191	3,795		1,266		208,252	4,112
Planta 5	34,7			277,558	63	3,000	280,621	112,248
Planta 5-Planta 6		153,999	18,075		1,270		173,344	3,414
Planta 6	33,7			269,651	63	6,000	275,714	110,285
Planta 6-Planta 7		107,489	12,372		1,271		121,133	2,382
Planta 7	26,2			209,408	63	9,000	218,470	87,388
Planta 7-Planta 8		74,746	518		1,264		76,527	1,514
Planta 8	15,8			126,638	63	3,000	129,701	51,880
Planta 8-Planta 9		17,447			1,100		18,548	421
Planta 9	2,2			17,312	63	3,000	20,375	8,150
Planta 9-Planta 10		12,170			1,269		13,438	265
Planta 10	1,3			10,389	63	3,000	13,451	5,380
Total	254	754,051	55,008	2,029,124	16,830	72,000	2,927,013	

Tabla 25. Cálculos para estimación de volúmenes de huecos de Figaredo

Para contrastar estos valores y corregirlos en las cotas superiores, se realizó el cálculo de huecos a partir del volumen ocupado por el agua infiltrada. Ésta se calculó a partir de la precipitación diaria durante el periodo de inundación –registrada en la Estación pluviométrica de Sta. Cruz de Mieres-, a la que se le sustrajo la evapotranspiración real calculada para el mismo periodo. Co-

nocido el periodo de retardo de la infiltración (19 días, como se verá en el siguiente apartado), a cada día se le consideró la infiltración correspondiente a la lluvia útil caída 19 días antes, la cual se calculó, de acuerdo con la expresión que se deducirá también en el apartado 5.4.1: INFILTRACIÓN (m³/día) = 0,23 · LLUVIA ÚTIL (m³/día) + 5300 (m³/día).

Una vez obtenida la infiltración diaria, se tiene el volumen que cada día se llena del embalse. Representando el acumulado día a día de este volumen, y conocida la evolución temporal de la cota de inundación, se tiene el volumen de huecos a cada cota, de una forma fiable. Este volumen se compara con el volumen acumulado de huecos estimados para ambos pozos a partir de la información obtenida de los planes de labores y se obtiene la siguiente gráfica.

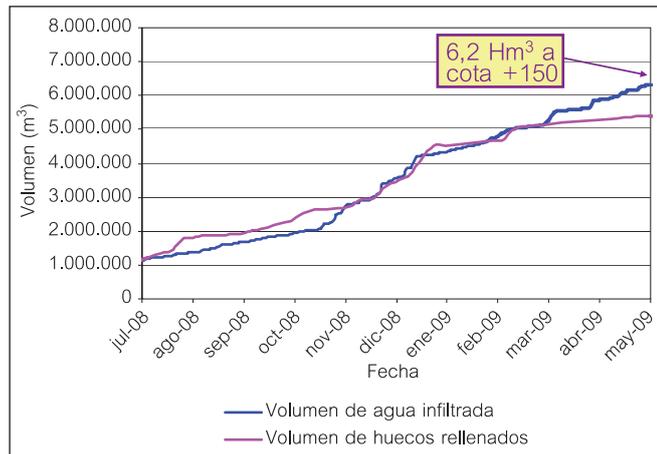


Figura 68. Variación temporal del volumen de llenado de los huecos durante la inundación y el de agua infiltrada al interior de los mismos

Como era de esperar, ambas curvas se ajustan bien en los niveles intermedios (mejor conocidos en cuanto a su explotación) y difieren mucho ($1,2 \text{ Hm}^3$) en los superiores, parte de cuya producción no había sido estimada. Esto nos permite validar el modelo, definir los coeficientes para el mejor ajuste de ambas curvas y deducir el volumen total de huecos del embalse minero para cada cota. **En particular, a cota +150 m, a la que está actualmente el agua en el embalse (70 m del brocal del pozo Barredo), el volumen total de huecos se estima en $6,2 \text{ Hm}^3$.**

Así, se ha incrementado el volumen de huecos en los niveles superiores de ambos pozos hasta hacer ajustar ambas curvas y se ha representado el volumen de huecos por m lineal de profundidad para los pozos Barredo, Figaredo y embalse conjunto, como se muestra a continuación.

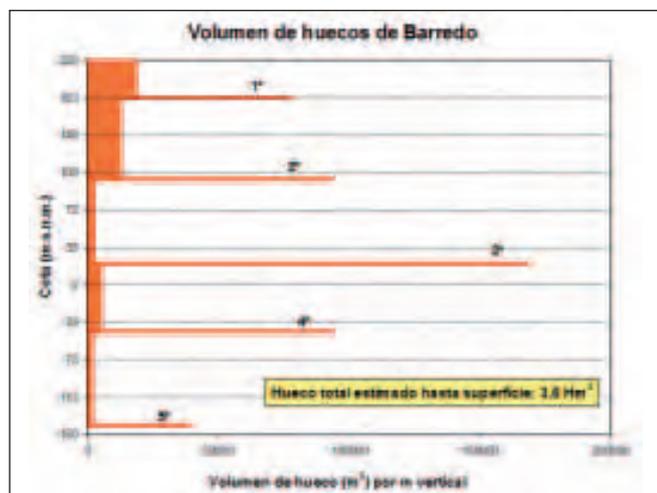


Figura 69. Volumen de huecos estimados a cada cota en Barredo

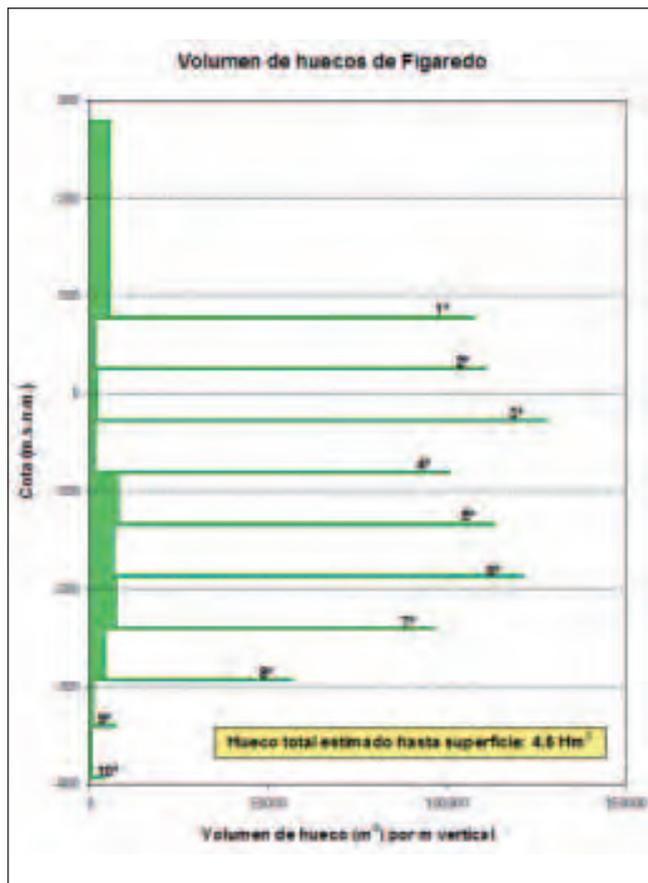


Figura 70. Volumen de huecos estimados a cada cota en Figaredo

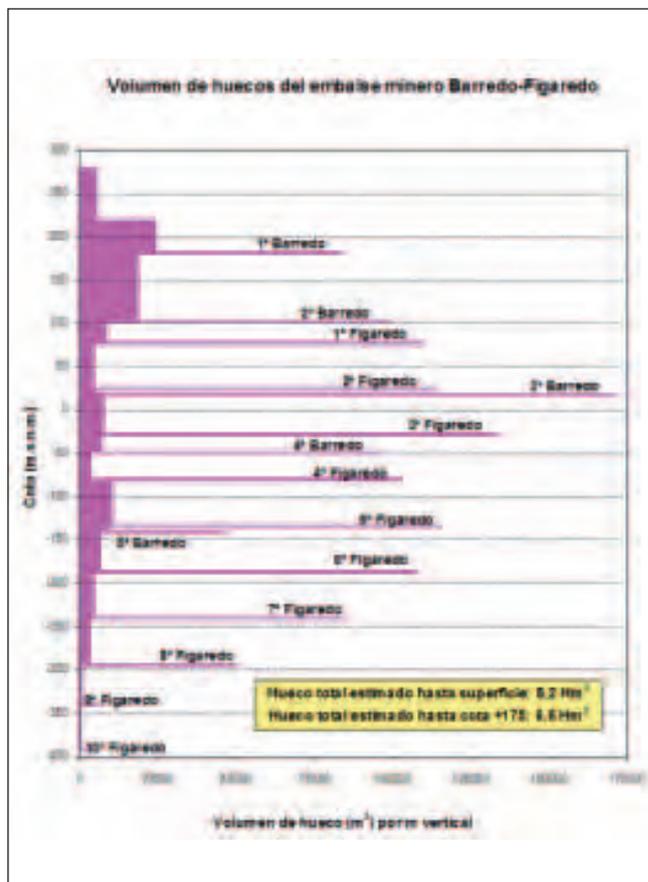


Figura 71. Volumen de huecos estimados a cada cota en el embalse conjunto Barredo-Figaredo

La curva definitiva de volumen acumulado en función de la profundidad quedaría entonces como sigue:

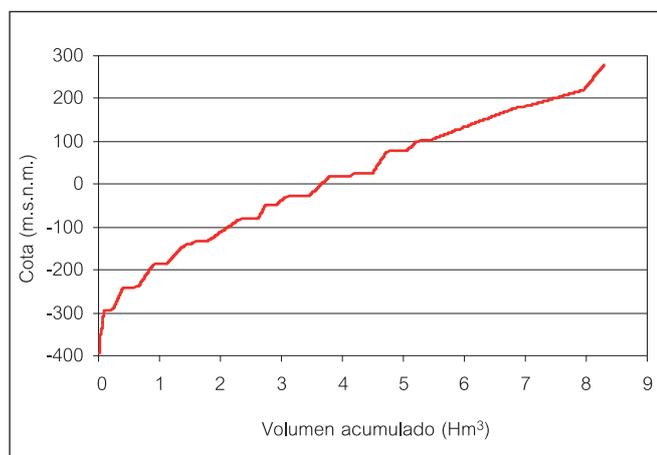


Figura 72. Volumen acumulado de huecos del embalse minero Barredo-Figaredo

5.4 El embalse minero y el rebote del nivel piezométrico

5.4.1 Relación entre bombeo y recarga

El volumen total desaguado anualmente por los pozos del Grupo HUNOSA con autorización de vertido en la zona objeto de estudio casi alcanzaba hasta la interrupción del bombeo los 7 millones de metros cúbicos. En la Tabla 26 se resumen los caudales aportados por los distintos pozos ubicados en el valle del Turón, durante el año 2007.

Mes	Pozo Santa Bárbara	Pozo San José	Pozo Figaredo	Pozo Barredo
Enero	-	126.314	155.262	57.167
Febrero	26.224	145.754	143.685	55.266
Marzo	70.145	319.955	190.998	73.542
Abril	79.473	415.939	313.181	188.055
Mayo	80.300	390.572	241.009	135.758
Junio	704	352.188	201.459	109.961
Julio	10.436	289.558	252.580	107.893
Agosto	7.923	260.493	206.667	83.713
Septiembre	9.900	270.033	177.716	67.470
Octubre	8.914	225.462	131.899	65.998
Noviembre	9.372	204.835	104.323	58.292
Diciembre	62.643	218.516	125.156	61.453
TOTAL	366.033	3.219.619	2.243.937	1.064.567

Tabla 26. Volúmenes desaguados (m³) en el año 2007 en los pozos del Grupo HUNOSA en el valle del Turón

A continuación se expone el sistema de desagüe de los pozos Barredo y Figaredo, así como los metros cúbicos desaguados, mes a mes, durante el período 2002-2007. Estos datos han sido facilitados por HUNOSA debiendo resaltar que su obtención no se realizó de forma empírica, sino que se calcularon conociendo las horas totales de bombeo mensuales (que quedan registradas en el sistema de control ambiental) y el caudal estimado de

las bombas, aplicando un coeficiente corrector del 85%, que fue estimado adecuado por los equipos de mantenimiento. Asimismo, también se ha utilizado como fuente el documento interno de HUNOSA, de 2004: “Desagüe de los Pozos Barredo y Figaredo”.

El conjunto de los pozos Barredo y Figaredo proporciona un desagüe total medio anual, para un año natural, de **4,1 Hm³/año** (Jardón, 2008).

Pozo Barredo

El sistema de desagüe del Pozo Barredo era del tipo denominado “en cascada”, por el que el agua es impulsada desde una sala de bombas en 5ª planta (-135 m.s.n.m.) a la sala de bombas de 3ª planta (+20,7 m.s.n.m.) y de ésta a la calle, salvando un desnivel de 200 metros. La sala de 5ª planta estaba dotada de 4 bombas que bombeaban, aproximadamente, 440 m³/h, hasta 3ª planta.

En 5ª Planta se aprovechaba la galería de comunicación Barredo-Figaredo para acumular el agua procedente de los minados, mediante la construcción en ella de una *cámara de almacenamiento* o *tape*, de unos 1250 m³ de capacidad, conectada con la caldera principal por medio de una tubería de PVC, que dispone de una válvula de cierre motorizada para regular el acceso del agua, lo que es muy útil para controlar y optimizar el desagüe de la planta.

La mayor cantidad de agua que llegaba a la caldera de 5ª planta procedía de este *tape* al que, además del agua de los minados, también llegaban aportes de menor entidad procedentes de las cunetas de 4ª planta mediante tubería. El resto de agua que iba a la caldera procedía de las propias cunetas de planta.

Desde la caldera de la caña del pozo partían tres manguones de tres de las bombas que entroncaban en un colector y desde ahí se impulsaba el agua a 3ª planta a través de una tubería.



Figura 73. Canal de vertido general Pozo Barredo (10-07-2007)

En 3ª planta la capacidad de almacenamiento es reducida, estando limitada a los 1500 m³ de la sala de bom-

Barredo	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Mínimo	Media	Máximo
Enero	75.405	133.408	240.674	177.613	154.949	57.167	57.167	139.869,3	240.674
Febrero	61.037	196.969	263.792	192.282	156.031	55.266	55.266	154.229,5	563.792
Marzo	72.886	221.357	207.559	276.522	185.325	73.542	72.886	172.865,2	276.522
Abril	80.576	142.144	215.181	317.242	172.687	188.055	80.576	185.980,8	215.181
Mayo	124.218	111.568	163.431	248.226	124.693	135.758	111.568	151.315,7	248.226
Junio	147.821	92.582	147.607	160.547	99.908	109.961	92.582	126.404,3	147.821
Julio	160.665	92.571	126.516	117.266	90.375	107.893	90.375	115.881	160.665
Agosto	138.255	86.708	133.071	80.134	81.153	83.713	80.134	100.505,7	138.255
Septiembre	112.263	67.560	110.394	64.876	65.212	67.470	64.876	81.295,8	112.263
Octubre	102.933	61.269	103.794	69.374	65.340	65.998	61.269	78.118	103.794
Noviembre	82.914	75.046	106.027	65.431	47.489	58.292	47.489	72.533,2	106.027
Diciembre	97.575	142.930	132.440	98.433	0	61.453	0	88.805,2	142.930
Total anual (m³)	1.256.548	1.424.112	1.950.486	1.867.946	1.243.162	1.064.568	814.188	1.467.804	2.456.150
Caudal mínimo (m³/h)	85	85	144	90	0	77			
Caudal máximo (m³/h)	223	307	366	441	257	261			
Caudal medio (m³/h)	145	165	226	216	144	123			

Tabla 27. Volúmenes mensuales y anuales desaguados, en m³, del pozo Barredo durante el período 2002-2007.

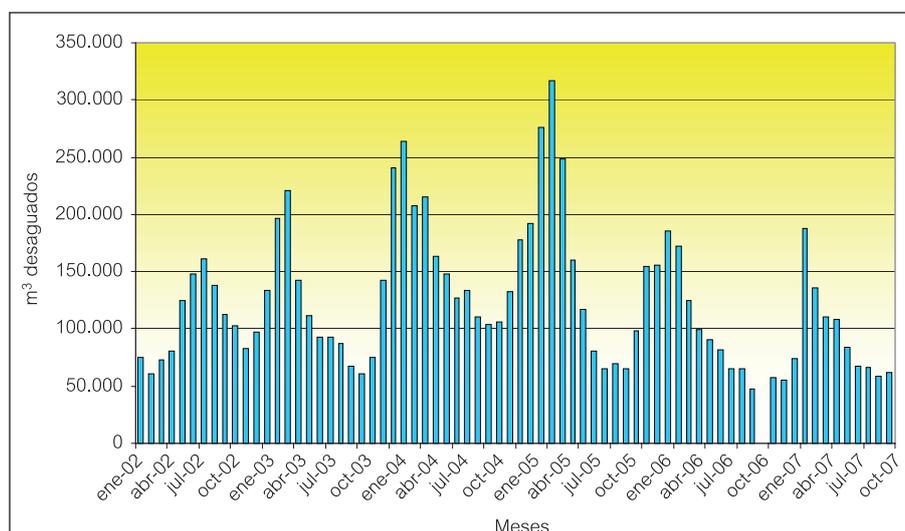


Figura 75. Representación de los caudales desaguados por el pozo Barredo durante el período 2002-2007.

Pozo Figaredo

El sistema de desagüe del Pozo Figaredo es más complejo que el anterior. En este caso se realizaba el bombeo al exterior desde tres salas de bombas, dos en el pozo San Inocencio, en 3ª planta y 7ª planta, y otra en 5ª planta del pozo San Vicente, la más alta de todas, a la cota +93 m.s.n.m. El vertido era directo al Río Turón.

La sala de 7ª planta estaba dotada de 4 bombas que bombeaban aproximadamente 642 m³/h de caudal. En 5ª planta, estaban ubicadas 5, capaces de bombear aproximadamente 975 m³/h. Por último, se disponía de una pequeña sala de bombas en 3ª planta, dotada de una bomba capaz de bombear 200 m³/h).

Los caudales totales evacuados mensualmente por el Pozo Figaredo, para el período 2002-2007, se exponen en la Tabla 28, y en la Figura 76 se representan en forma de diagrama de barras.

Periodo de retardo

Como ya se ha explicado en la sección 4, al no disponer de datos diarios de bombeo, para poder determinar el periodo de retardo se han utilizado los siguientes criterios para cada uno de los pozos:

En el caso del pozo Figaredo, se dispone de los días de máximo bombeo en los pozos San Vicente y San Inocencio, durante los últimos años, recogidos en los planes de labores consultados. Comparando estos días de máximo desagüe con las puntas de lluvia útil registrada en los días anteriores, se han obtenido los periodos de retardo correspondientes, como se muestra en el ejemplo de la gráfica para el año 1992. Considerando todos estos valores, se ha llegado a que **el periodo de retardo de la infiltración en el conjunto del pozo Figaredo es de 19 ± 5 días**, lo que está de acuerdo con otras cifras estimadas en estudios anteriores para pozos de la Cuenca Carbonífera Central Asturiana (García-Fuente, P.A., 1996). Los valores recogidos y calculados se muestran en la Tabla 29.

Figaredo	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Mínimo	Media	Máximo
Enero	146.574	172.496	326.311	207.229	168.916	155.262	146.574	196.131	326.311
Febrero	149.079	276.959	351.763	219.764	153.929	143.685	143.685	215.863	351.763
Marzo	165.553	269.304	404.505	463.075	263.490	190.998	165.553	292.821	463.075
Abril	153.590	214.781	309.019	307.859	214.269	313.181	153.590	252.117	313.181
Mayo	224.617	185.443	279.123	238.323	173.152	241.009	173.152	223.611	279.123
Junio	219.558	164.120	264.700	213.909	141.735	201.459	141.735	200.914	264.700
Julio	201.346	156.502	225.293	185.455	119.574	252580	119.574	190.125	252.580
Agosto	194.423	153.713	187.233	168.479	113.691	206667	113.691	170.701	206.667
Septiembre	172.613	159.985	157.363	161.507	111.555	177716	111.555	156.790	177.716
Octubre	165.848	154.310	141.681	150.817	118.040	131899	118.040	143.766	165.848
Noviembre	154.427	133.003	134.028	142.267	110.555	104323	104.323	129.767	154.427
Diciembre	164.698	191.965	139.991	161.215	0	125156	0	173.212	191.965
Total anual (m³)	2.112.326	2.232.581	2.921.010	2.619.899	1.688.906	2.243.935	1.491.472	2.345.817	3.147.356
Caudal mínimo (m³/h)	204	185	186	198	0	145			
Caudal máximo (m³/h)	312	385	562	643	366	435			
Caudal medio (m³/h)	244	258	338	303	195	260			

Tabla 28. Volúmenes mensuales y anuales desaguados, en m³, del pozo Figaredo durante el periodo 2002-2007.

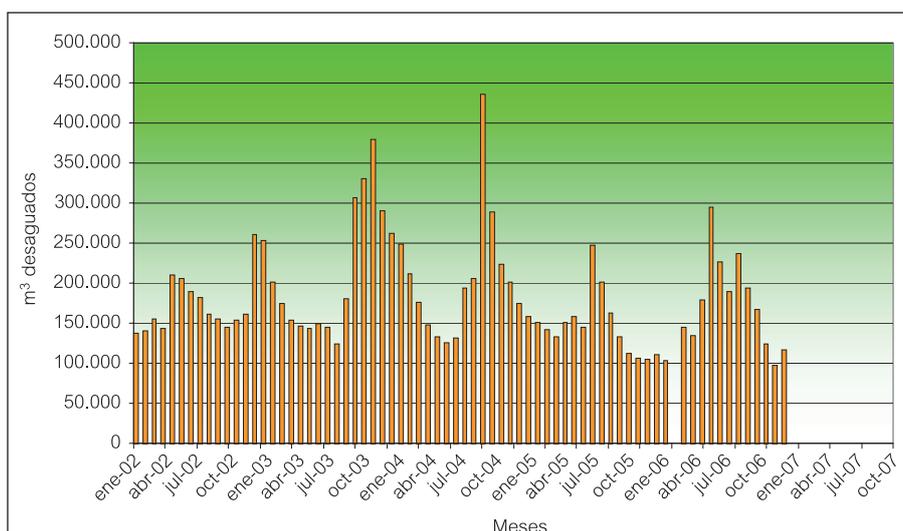


Figura 76. Representación de los caudales desaguados por el pozo Figaredo durante el periodo 2002-2007.

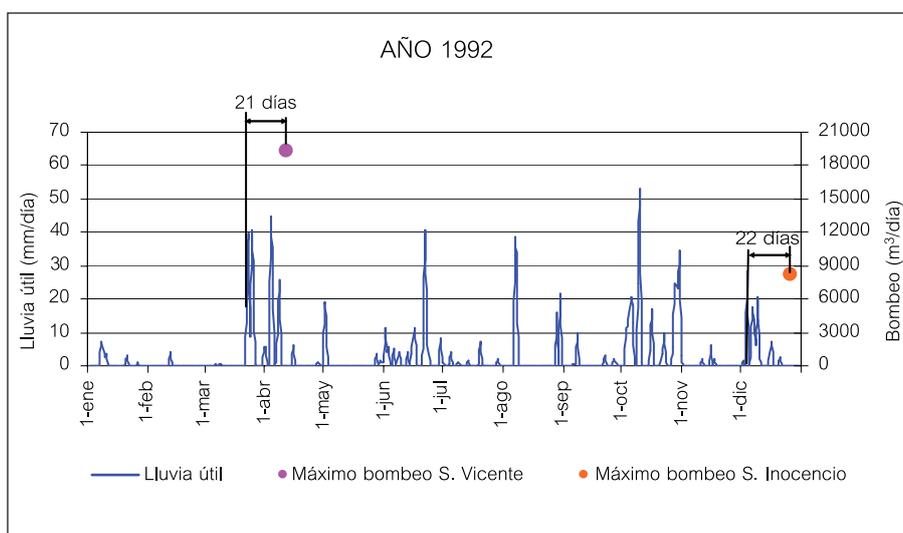


Figura 77. Relación entre lluvia útil diaria y días de máximo bombeo en los pozos San Vicente y San Inocencio de Figaredo, en el año 1992

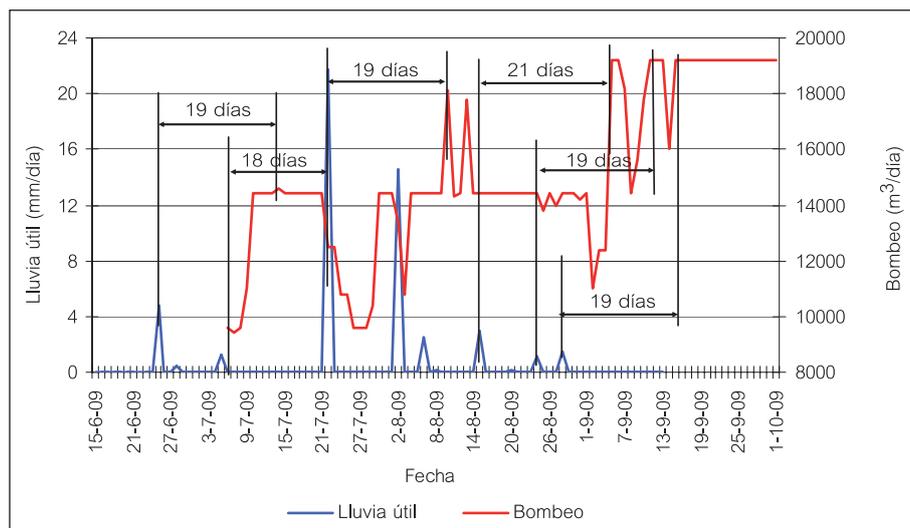


Figura 78. Relación entre lluvia útil diaria y bombeo diario en el pozo Barredo, mostrando un retardo medio de 19 días

Año	San Vicente			San Inocencio		
	Día de máx. bombeo	Bombeo (m ³ / día)	Retardo (días)	Día de máx. bombeo	Bombeo (m ³ / día)	Retardo (días)
1985	25-may	12699	20	30-jul	4807	22
1986	03-mar	19731	24	26-abr	5127,87	22
1987	23-feb	13608	12	10-jun	5319	19
1988	15-abr	37143	12	17-abr	7883	12
1989	08-may	15822	14	23-jun	7097	24
1990	19-dic	11810	11	21-ene	4959	15
1991	14-may	28715	13	25-may	8189	17
1992	12-abr	19353	21	26-dic	8189	22
1993	02-may	8704	29	08-may	9131	13
1994	10-mar	4276	10	28-ene	6718	12
1995	16-mar	10592	19	29-mar	7041	19
1996	13-mar	10838	23	13-dic	8909	22
1997	21-ene	9203	18	26-ene	8498	23
1998	16-may	10562	16	28-may	10123	25
1999	15-abr	12968	19	12-mar	4271	13
2000	05-ene	13891	22	05-ene	7304	22
2001	01-abr	3020	29	21-ene	5644	23
2002	12-may	3840	30	31-may	4349	23
2003	03-mar	6120	27	04-mar	6188	28
2004	23-mar	11290	18	15-mar	6672	18
2005	13-mar	12690	15	16-mar	12796	13

Tabla 29. Datos de bombeo máximo diario en el pozo Figaredo y cálculo de periodos de retardo de la infiltración en cada caso

Para el caso del pozo Barredo, los días de máximo bombeo anual no fueron recogidos en los planes de labores, pero se pudo disponer de datos diarios de bombeo durante cuatro meses de 2009, obtenidos a partir de las horas de funcionamiento de las cuatro bombas instaladas en dicho pozo. Como se resume en la siguiente gráfica, **el periodo medio de retardo de la infiltración en el pozo Barredo es también de 19 días**, lo que corrobora la estimación anterior.

Por tanto, se deduce que el desfase entre precipitación e infiltración para el conjunto del embalse minero Barredo-Figaredo es de 19 días, y así se considerará en los cálculos posteriores. Adicionalmente, cabe destacar que se mantiene un cierto bombeo en los periodos

secos, indicando que existe un aporte “constante” de infiltración además del procedente de las precipitaciones (infiltración de agua del río Turón en la zona más fracturada).

A partir de los datos de bombeo mensuales de los pozos Barredo y Figaredo durante el periodo 2002-2007, desechando aquellos conducentes a valores extremos, se deduce que la infiltración mensual (suma del caudal bombeado en ambos pozos), toma un valor promedio, durante el periodo considerado, de 320.000 ± 70.000 m³/mes, variando entre el 9 y casi el 80% de la lluvia útil (considerando un periodo de retardo de infiltración de 19 días), en función de la magnitud de ésta. En los meses en los que la lluvia útil es escasa, una parte importante de la misma

es infiltrada (y luego bombeada) en las labores mineras, mientras que en aquellos meses de mayor precipitación y baja evapotranspiración, una parte importante de la lluvia útil resultante genera escorrentía, en detrimento de la porción de infiltración, que es más constante. Expresando la lluvia útil en m^3 , teniendo en cuenta el área de la cuenca de afección de los pozos Barredo y Figaredo ($18,59 \text{ km}^2$, Figura 39), se obtiene una relación entre ésta y la infiltración (conocida en los meses de los que se tiene el caudal bombeado), como se muestra en la siguiente gráfica:

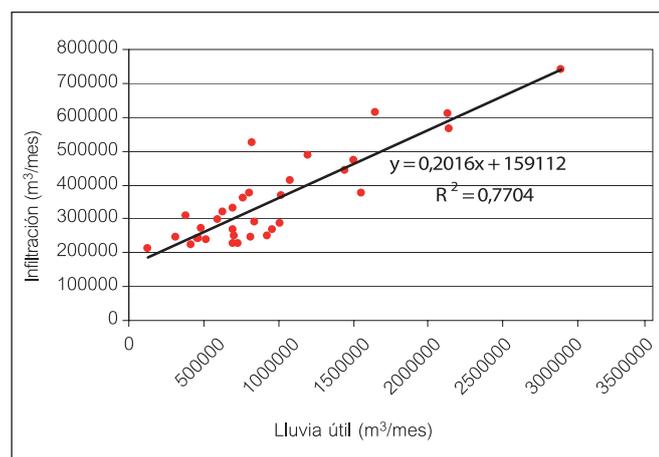


Figura 79. Relación entre la lluvia útil mensual y la infiltración al interior del embalse minero Barredo-Figaredo

Según la anterior relación y los cálculos realizados, se deduce que **la infiltración mensual (en m^3) se puede obtener muy aproximadamente como un 20-23% de la lluvia útil mensual (en m^3), al que se suma una constante ($150.000 \text{ m}^3/\text{mes}$), no supeditada al aporte pluvial. En ella no intervienen aportes de acuíferos conexos, por la escasa permeabilidad de los materiales de la zona, salvo por fracturación inducida por la actividad minera.** Este término independiente corresponde al aporte de agua del río que se infiltra durante su recorrido por la cuenca de afección de ambos pozos y es el responsable de que se mantenga cierto bombeo en épocas sin lluvias, como ya se ha dicho, y del rápido ascenso del nivel de agua durante el periodo de inundación, injustificado sólo por la infiltración de parte de la lluvia útil, como se verá. Este hecho es asimismo corroborado en los aforos de caudal del río Turón (ver sección X), en los que se comprueba que el caudal en Peñule (casi en la desembocadura y aguas abajo de la zona más minada de Figaredo) es en general menor que en La Veguina (aguas arriba de Figaredo). Esta diferencia queda enmascarada en los episodios tormentosos que generan puntas de caudal, pero en general corresponde a un promedio de 61 l/s , es decir, unos $5300 \text{ m}^3/\text{día}$, o lo que es lo mismo, $159.000 \text{ m}^3/\text{mes}$, valor que coincide con el término independiente de la anterior ecuación.

Análogamente, se ha buscado la expresión que más fielmente relaciona la lluvia útil diaria con la infiltración al interior del embalse minero Barredo-Figaredo, llegándose a la siguiente expresión, coherente con la anterior y que será de gran utilidad para estimar el llenado de volumen

de huecos a partir de la infiltración de precipitación durante la inundación:

$$\text{INFILTRACIÓN (m}^3/\text{día)} = 0,23 \cdot \text{LLUVIA ÚTIL (m}^3/\text{día)} + 5300 \text{ (m}^3/\text{día)}$$

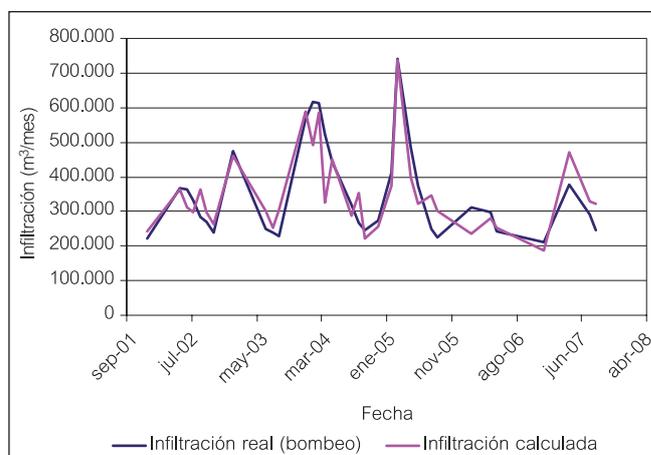


Figura 80. Relación entre la infiltración calculada a partir de la lluvia útil diaria y la infiltración real (equiparable al bombeo) en el embalse minero Barredo-Figaredo

Para comprobar la fiabilidad de la anterior expresión, se ha aplicado para calcular la infiltración diaria del periodo 2002-2007 y sumada por meses se ha comparado con los datos de bombeo mensual de los que se dispone, obteniéndose (tras desechar algunos valores erróneos), un ajuste muy aceptable entre infiltración real y calculada (coeficiente de correlación = 0,8), como se observa en la figura 80. Cabe indicar, no obstante, que se trata de una expresión simplificada, que permite hacer aproximaciones de los valores reales, que en algún caso concreto pueden distar de los calculados.

5.4.2 Características hidrogeológicas de las formaciones permeables existentes

Como ya se comentó en la Introducción, en el apartado 2.2.5 Hidrogeología, así como en el apartado 4.4.2 CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DE LAS FORMACIONES PERMEABLES EXISTENTES, los materiales presentes en la zona de trabajo incluyen lutitas, limonitas, areniscas, microconglomerados, conglomerados, calizas y capas de carbón de edad Carbonífera, y depósitos cuaternarios. En el citado apartado se hizo una clasificación de los materiales según su permeabilidad, pudiendo reconocer cuatro conjuntos principales: 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. Se vio además, que 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 o fallas como posibles vías de drenaje, y los grandes huecos ocasionados por las labores mineras.

Materiales carboníferos	Clasificación	Trasmisividad (m ² /día)	Permeabilidad (m/s)
materiales de permeabilidad muy baja a nula	Lutitas o limonitas con intercalación de capas de carbón	$5.79 \cdot 10^{-7}$	$2.96 \cdot 10^{-8}$
materiales de baja permeabilidad por fisuración	cuarcitas, areniscas calcáreas y arcillosas, micropudingas y pudingas	$7.52 \cdot 10^{-5}$	$3.92 \cdot 10^{-5}$
materiales de permeabilidad variable por fisuración y karstificación	calizas y dolomías intercaladas entre la serie de lutitas y limolitas	Valores variables en función del grado de karstificación y del tipo de relleno posterior.	
Depósitos cuaternarios			
materiales de permeabilidad variable por porosidad intergranular	Desde lutitas a gravas		$10^{-5} - 10^{-6}$ (arenas arcillosas y las arcillas arenosas) $10^{-5} - 10^{-6}$ (gravas)

Tabla 30. Características hidrogeológicas de las formaciones permeables existentes

En la Tabla 30 se muestra a modo de resumen las características hidrogeológicas de cada uno de los conjuntos mencionados anteriormente:

A partir de información bibliográfica y cartográfica recopilada, en particular Convenio HUNOSA (2008) así

como trabajo de campo, se ha realizado una cartografía hidrogeológica, con la finalidad de mostrar algunas características de los diferentes niveles litológicos y sobre la que se han superpuesto diversos aspectos de índole hidrogeológica.

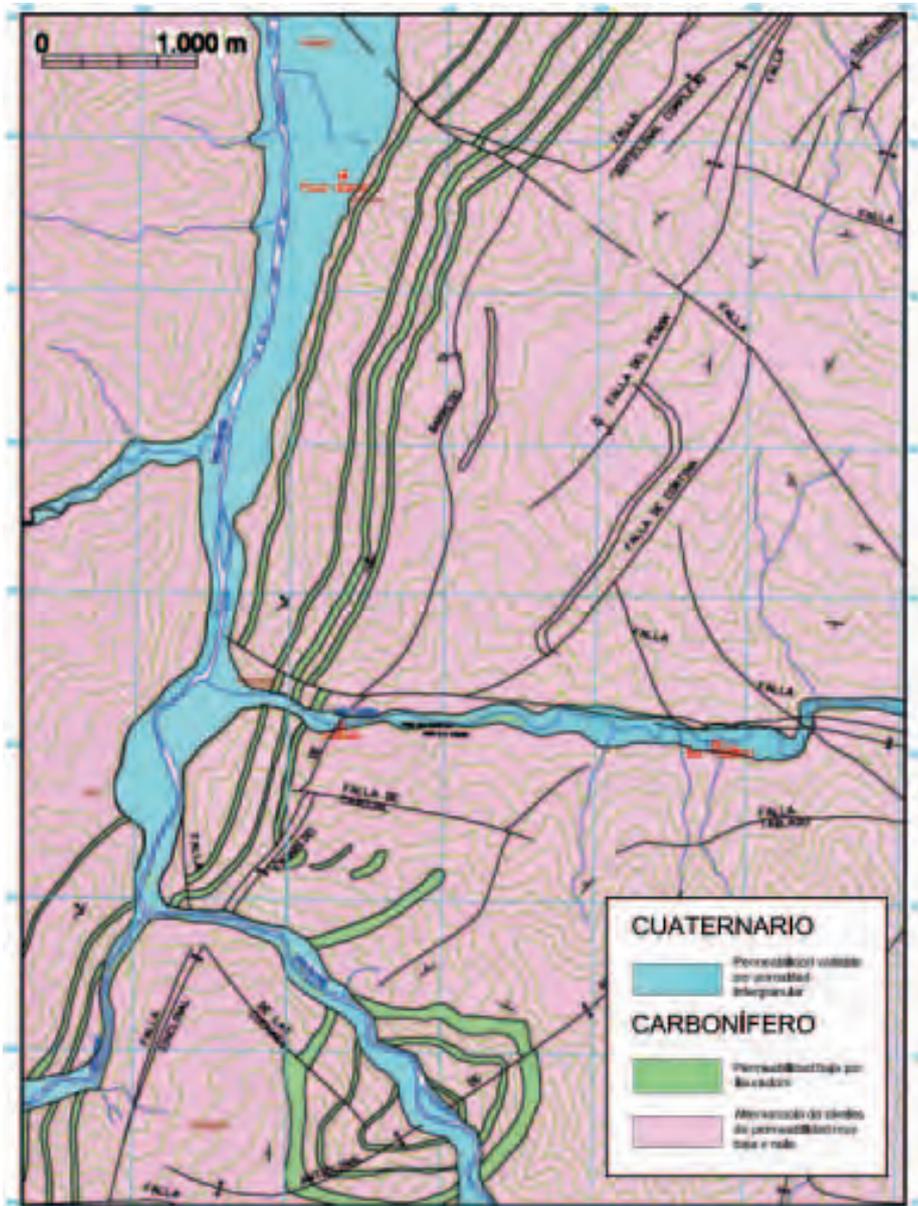


Figura 81. Mapa hidrogeológico del entorno de los pozos Barredo-Figaredo

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

- materiales con permeabilidad muy baja a nula (color rosa)
- materiales con permeabilidad variable por porosidad intergranular (color azul claro)
- materiales con permeabilidad baja por fisuración (color verde)

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 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 (convenio HUNOSA, 2008).

5.4.3 El embalse subterráneo

El proceso de inundación

Tal y como se menciona en el informe realizado por HUNOSA en colaboración con la Universidad de Oviedo y el IGME sobre la Inundación de los Pozos Mineros en la Zona Barredo – Valle del Turón – Valle del Aller (Convenio HUNOSA, 2008), el proceso de inundación se inició el 18 de abril del 2007 cuando detuvieron las bombas de 10ª planta en el Pozo Figaredo (San Inocencio). Desde esa fecha se produjo el abandono del bombeo de forma escalonada, primero en el resto de las plantas de San Inocencio, y a continuación en San Vicente (Figaredo), Barredo en abril del 2008 y San José en junio de 2008. En el Pozo Santa Bárbara se mantuvieron bombeos puntuales hasta agosto de 2008. A fecha de 30 de diciembre de 2008, debido a que el nivel de agua en San José se encontraba relativamente próximo al nivel de seguridad establecido por su posible conexión con el Pozo Santiago, se reactivó el bombeo en el Pozo Santa Bárbara, desaguando 9.768 m³ en ese mes.

El control de la evolución del nivel del agua se realizó semanalmente desde el 1 de agosto de 2008 hasta Mayo de 2009 en los cuatro pozos, mediante la medida con un hidronivel marca Seba (Figura 82), aunque el Departamento de Medio Ambiente del Grupo HUNOSA realizó medidas en los dos meses anteriores en los pozos San José y Santa Bárbara con su propio sistema de control.

Junto con cada medida se toma una muestra de agua con una botella tomamuestras para la determinación de los parámetros in situ: pH, temperatura y conductividad eléctrica. Los niveles de agua medidos hasta la fecha se muestran en la Tabla 31 y gráficamente en la Figura 83.



Figura 82. Medidor de hidronivel marca Seba

Desde el 18 de mayo de 2009, la medida del nivel de agua en los cuatro pozos está automatizada, mediante un sistema de medición en continuo que ofrece 4 datos cada hora. En la siguiente tabla únicamente se muestra el último valor de cada uno de los días, cuya representación gráfica se muestra a continuación.

Fecha	Santa Barbara (330,9)	San Jose (293,8)	Figaredo (253,7)	Barredo (220)
11/06/2008	73,510			
17/06/2008		11,120		
19/06/2008	72,560			
26/06/2008		36,820		
01/07/2008		41,320		
04/07/2008		42,820		
08/07/2008		44,020		
11/07/2008		44,820		
15/07/2008		45,720		
18/07/2008		46,420		
23/07/2008		47,720		
27/07/2008			-180,045	
01/08/2008	56,900		-167,410	-126,330
05/08/2008		50,920	-156,400	
08/08/2008	55,060	51,670	-152,210	-126,500
12/08/2008		52,020	-145,000	
14/08/2008	52,310	52,420	-138,700	-126,350
19/08/2008		52,520	-130,950	
22/08/2008	54,970*	52,820	-128,800	-126,400
26/08/2008		52,820	-127,150	
29/08/2008	58,610	53,350	-125,550	-126,410
01/09/2008	53,620			-126,410
05/09/2008	62,560	54,020	-123,400	-126,400
09/09/2008		54,120	-122,230	
15/09/2008	64,210	54,620	-120,560	-123,950
19/09/2008	64,560	54,690	-118,250	-122,150
24/09/2008	65,010	54,690	-115,660	-119,540
30/09/2008	65,210	54,320	-110,550	-114,700
02/10/2008	65,580	55,390	-107,200	-111,160
10/10/2008	66,010	54,020	-98,900	-102,900
17/10/2008	66,400	53,720	-90,200	-94,180
24/10/2008	66,690	53,470	-81,700	-85,680

Fecha	Santa Barbara (330,9)	San Jose (293,8)	Figaredo (253,7)	Barredo (220)
31/10/2008	67,060	53,320	-76,850	-80,740
07/11/2008	67,720	53,670	-73,270	-77,150
14/11/2008	68,660	57,340	-69,730	-73,700
21/11/2008	69,490	64,030	-65,300	-69,080
27/11/2008	71,110	72,180	-56,940	-61,040
05/12/2008	83,390	86,520	-43,850	-48,920
12/12/2008	98,160	89,470	-36,500	-42,820
19/12/2008	112,860	93,570	-24,400	-29,300
29/12/2008	137,960**	117,220	-9,010	-12,770
02/01/2009	136,960	125,820	4,820	-0,350
09/01/2009	132,310	128,270	24,100	19,200
16/01/2009	128,160	127,120	30,500	26,050
23/01/2009	124,660	123,220	35,200	29,100
30/01/2009	122,460	120,620	37,600	32,500
06/02/2009	132,210	121,320	45,500	40,400
13/02/2009	134,510	127,740	55,500	50,300
20/02/2009	143,910	136,070	68,550	63,600
27/02/2009	146,760	141,070	79,400	75,200
06/03/2009	146,210	142,820	84,900	80,750
18/05/2009	173,860	173,860	156,439	151,654
19/05/2009	174,259	174,259	156,895	151,996
20/05/2009	174,602	174,602	157,237	152,224
21/05/2009	175,058	175,058	157,580	152,567
22/05/2009	175,344	175,344	157,808	152,909
23/05/2009	175,743	175,743	158,265	153,251
24/05/2009	176,142	176,142	158,721	153,594
25/05/2009	176,485	176,485	159,178	154,050
26/05/2009	176,770	176,770	159,406	154,507
27/05/2009	177,112	172,659	159,862	154,849
28/05/2009	177,284	172,088	160,319	155,191
29/05/2009	177,341	171,746	160,661	155,648
30/05/2009	177,341	171,518	161,003	155,990
31/05/2009	177,341	171,518	161,346	156,333
01/06/2009	177,284	171,403	161,802	156,675
02/06/2009	177,284	171,403	162,145	157,131
03/06/2009	177,284	171,289	162,487	157,474
04/06/2009	177,284	171,175	163,058	157,816
05/06/2009	177,169	171,061	163,400	158,158
06/06/2009	177,169	170,947	163,628	158,501
07/06/2009	177,169	171,061	163,971	158,957
08/06/2009	177,055	171,061	164,313	
09/06/2009	176,998	170,947	164,769	
10/06/2009	176,827	171,061	165,112	
11/06/2009	176,827	170,833	165,454	
12/06/2009	176,770	170,833	165,682	
13/06/2009	176,713	170,833	165,911	
14/06/2009	176,713	170,833	166,253	
15/06/2009	176,599	170,947	166,710	
16/06/2009	176,542	170,947	167,052	161,438
17/06/2009	176,485	170,833	167,280	161,381
18/06/2009	176,428	170,833	167,052	161,153
19/06/2009	176,485	170,833	166,938	160,924

Fecha	Santa Barbara (330,9)	San Jose (293,8)	Figaredo (253,7)	Barredo (220)
20/06/2009	176,314	170,719	165,911	159,384
21/06/2009	176,199	170,490	165,226	158,699
22/06/2009	176,142	170,490	164,769	158,243
23/06/2009	176,028	170,262	164,085	157,729
24/06/2009	176,028	170,148	163,628	157,101
25/06/2009	175,914	169,920	163,286	156,816
26/06/2009	175,743	169,806	162,829	156,131
27/06/2009	175,629	169,692	162,373	155,846
28/06/2009	175,458	169,692	161,688	155,218
29/06/2009	175,344	169,235	161,346	154,933
30/06/2009	175,172	169,121	161,688	155,846
01/07/2009	175,058	169,007	161,802	155,732
02/07/2009	174,887	168,779	161,574	155,218
03/07/2009	174,773	168,550	161,232	155,104
04/07/2009	174,602	168,550	161,460	155,218
05/07/2009	174,488	168,436	161,346	155,218
06/07/2009	174,316	168,094	161,232	155,161
07/07/2009	174,202	167,980	161,346	155,104
08/07/2009	173,974	167,866	161,346	154,990
09/07/2009	173,860	167,637	160,889	154,305
10/07/2009	173,689	167,409	160,547	153,849
11/07/2009	173,575	167,295	160,090	153,278
12/07/2009	173,346	167,295	159,520	152,936
13/07/2009	173,289	166,953	159,178	152,537
14/07/2009	173,004	166,610	158,835	152,137
15/07/2009	172,833	166,496	158,493	151,795
16/07/2009	172,776	166,382	158,379	151,738

Tabla 31. Cota absoluta del nivel del agua, medida en la caña de los pozos. Entre paréntesis figura la cota (m.s.n.m.) del brocal de cada pozo (* Cese de bombeo en el Pozo Santa Bárbara; ** Reactivación del bombeo en el Pozo Santa Bárbara)

En la Figura 83 se observa el análogo comportamiento entre Barredo y Figaredo (cuyo nivel asciende paralelamente en ambos, únicamente distanciado unos 3-4 m) y de San José y Santa Bárbara, a los que les ocurre prácticamente lo mismo. Sin embargo, el comportamiento de ambas parejas de pozos (que constituyen sendos embalses mineros) difieren entre sí, sugiriendo que las conexiones entre ambos no son muy francas.

A continuación se comenta la inundación de dichos embalses:

Hasta que se alcanzó la cota de conexión de planta 5ª del Pozo Barredo con planta 5ª del Pozo Figaredo (Pozo San Inocencio) situada a -142 m.s.n.m. y -135 m.s.n.m., respectivamente, la recuperación del nivel piezométrico provocó la inundación de las labores más profundas del Pozo Figaredo, ascendiendo en éste con una velocidad de 1,97 m/día, mientras que el nivel del agua en el Pozo Barredo permanecía aproximadamente estable a la cota de -126,4 m.s.n.m., que es la cota más baja de dicho pozo. Una vez rebasado el nivel de conexión, el agua asciende paralelamente en ambos pozos con una velocidad media de 1 m/día.

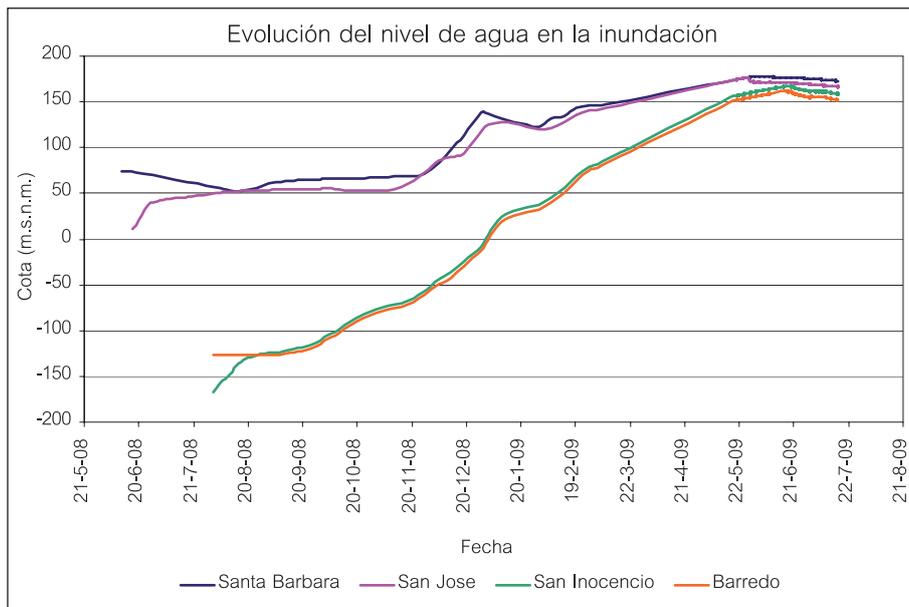


Figura 83. Evolución de la cota absoluta del agua medida en la caña de los pozos durante la fase de inundación

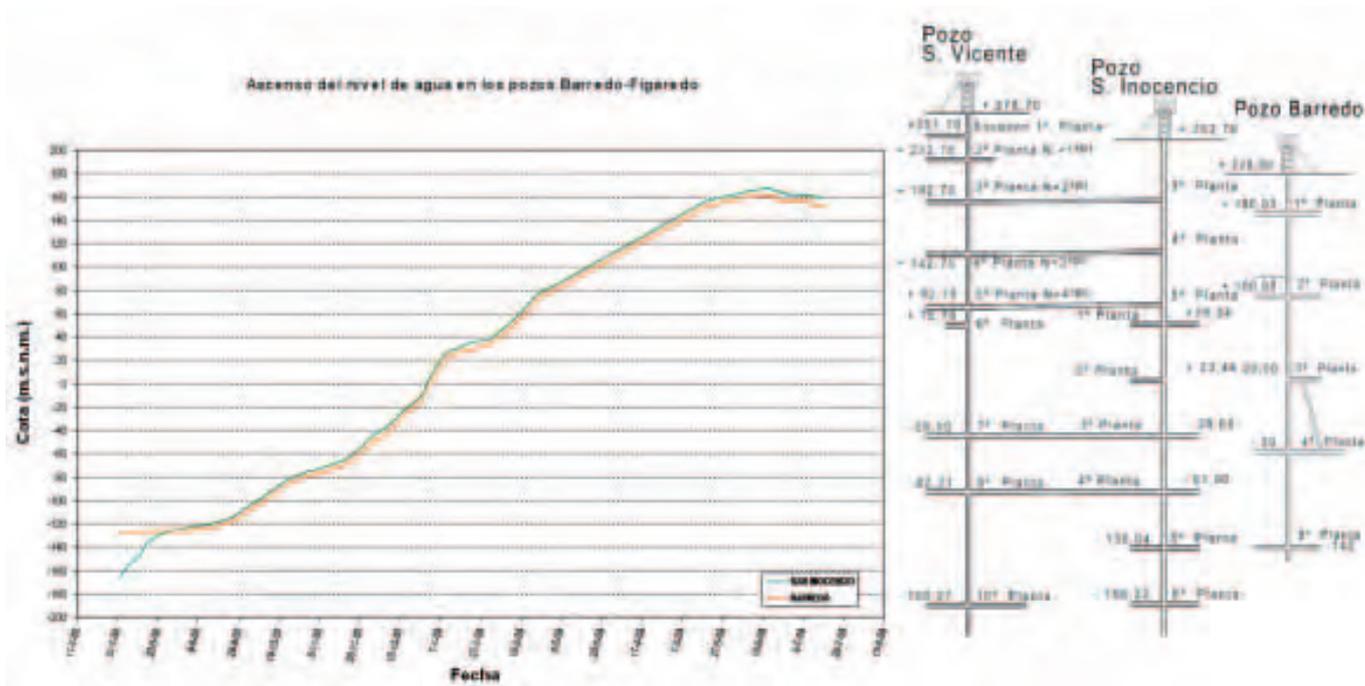


Figura 84. Evolución de la cota absoluta del agua, medida en la caña de los pozos Barrado (+220 m.s.n.m.) y Figaredo (San Inocencio) (+253,70 m.s.n.m.)

En la Figura 84 se puede ver el proceso de inundación de estos dos pozos, junto con el esquema vertical de los mismos, lo que permite comparar la altura de las distintas plantas con la evolución del nivel de inundación de los pozos. En la misma línea, en la Figura 85 se observan las curvas de recuperación correspondientes a ambos pozos frente al volumen de huecos en cada cota, calculado para ambos pozos en la sección anterior. Lógicamente, la velocidad de ascenso depende del volumen de infiltración (y por ende de la precipitación), pero en general, es mayor entre plantas y se reduce al alcanzar los tramos de mayor volumen de hueco minero, disminuyendo especialmente la pendiente de las curvas en aquellos tramos en los que prácticamente coinciden plantas de ambos pozos.

El ascenso del nivel de agua en los pozos Santa Bárbara y San José es más variable debido al cese del bombeo en el Pozo Santa Bárbara y su posterior reactivación y a las posibles conexiones entre ambos pozos por debajo de 3ª planta, a través del macizo rocoso fracturado.

El registro de medidas en el Pozo San José comienza cuando el agua estaba a la cota de +11,1 m.s.n.m., entre 6ª y 5ª planta. El agua ascendía a una velocidad de 1,5 m/día desde la primera medida (17 de junio del 2008) hasta el 1 de julio de 2008, cuando alcanza la cota de +41,3 m.s.n.m. (por encima de 5ª planta). Posteriormente el ascenso se ralentiza a 0,25 m/día quizás a causa del llenado de 5ª planta, y desde el 14 de agosto al 7 de noviembre el nivel de agua permanece más o menos estable entre

+52,5 y +53,5 m.s.n.m. (continúa entre 5ª y 4ª planta). La estabilización del nivel en torno a la cota de +53 m.s.n.m. se podría explicar por la inundación de 6ª planta y 6ª planta vieja del Pozo Santa Bárbara (a +68,0 m.s.n.m y +40,6 m.s.n.m. respectivamente).

A partir de noviembre de 2008 el agua vuelve a ascender con una velocidad de 1,3 m/día hasta el mes de diciembre, cuando se reanuda el bombeo de Santa Bárbara para mantener un nivel de seguridad en el conjunto San José- Santa Bárbara, debido a la posible conexión del Pozo San José con el Pozo Santiago (aún activo) a cota

+135 m.s.n.m. Esto obviamente ha frenado el ascenso y deprimido ligeramente el nivel de agua en San José y en Santa Bárbara en el mes de enero de 2009.

En el Pozo Santa Bárbara se realizó un primer cese en el bombeo desde septiembre de 2007 hasta febrero de 2008, fecha en la que se reanudó el bombeo hasta el 22 de agosto de 2008. Este bombeo evacua menos agua de la que entra, ya que desde enero de 2007 hasta julio de 2007 se produce un ascenso de agua a una velocidad media de 0,28 m/día (Figura 86). En la Figura 87 se muestra la evolución del nivel en estos pozos.

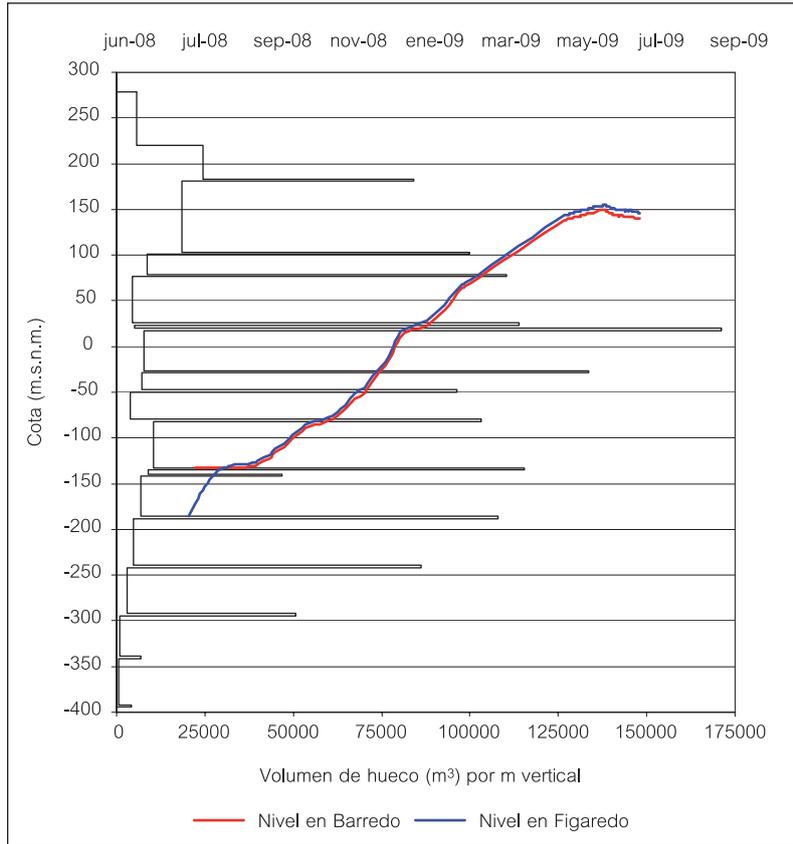


Figura 85. Evolución temporal de los niveles de inundación en los pozos Barredo y Figaredo en relación a los huecos estimados

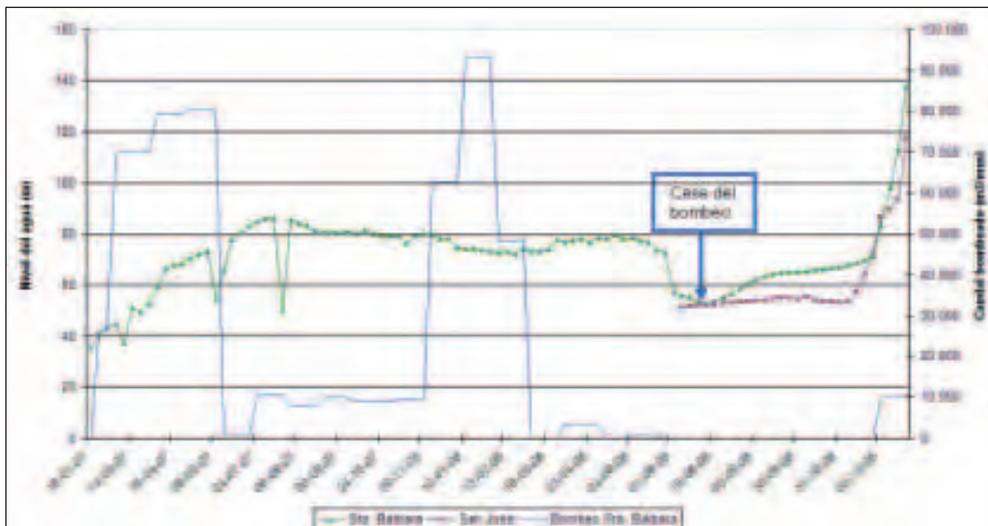


Figura 86. Evolución de la cota absoluta del agua en los pozos San José y Santa Bárbara comparados con el bombeo en el Pozo Santa Bárbara, en el periodo 2007-2008

Entre agosto de 2007 y junio de 2008 el agua se mantiene más o menos estabilizada entre las cotas + 68 y + 75 m.s.n.m., produciéndose un descenso brusco en el nivel entre junio y agosto de 2008. El cese de bombeo el 22 de agosto de 2008 en el Pozo Santa Bárbara ocasiona, como cabría suponer, un ascenso del agua, si bien se realiza a diferentes velocidades: hasta el 4 de septiembre la velocidad media es de 0,47 m/día, posteriormente, se ralentiza a 0,1 m/día hasta el 27 de noviembre, fecha en la que comienza a ascender muy rápidamente (2 m/día). Este último ascenso rápido ocasiona que el 30 de diciembre de 2008 se considere oportuno comenzar una nueva etapa de bombeo.

A partir del verano de 2009, se reestableció el bombeo en los pozos Barredo y San José, para controlar el ascenso del nivel en ambos embalses, los cuales se mantienen aproximadamente a 148 y 75 m de sus brocales, respectivamente. Las últimas medidas tomadas a fecha de la realización de este informe, en Diciembre de 2009, corresponden a +151 y +145 m.s.n.m. para los pozos Figaredo (San Inocencio, 4ª planta) y Barredo (entre 1ª y 2ª planta), respectivamente, así como a +150 m.s.n.m. (4ª planta) para el pozo Santa Bárbara y +145 m.s.n.m. (3ª planta) para el pozo San José, a unos 8 m por encima de la cota de la posible conexión de este último pozo con el pozo Santiago, como se muestra en la siguiente pantalla del programa de monitorización en continuo.

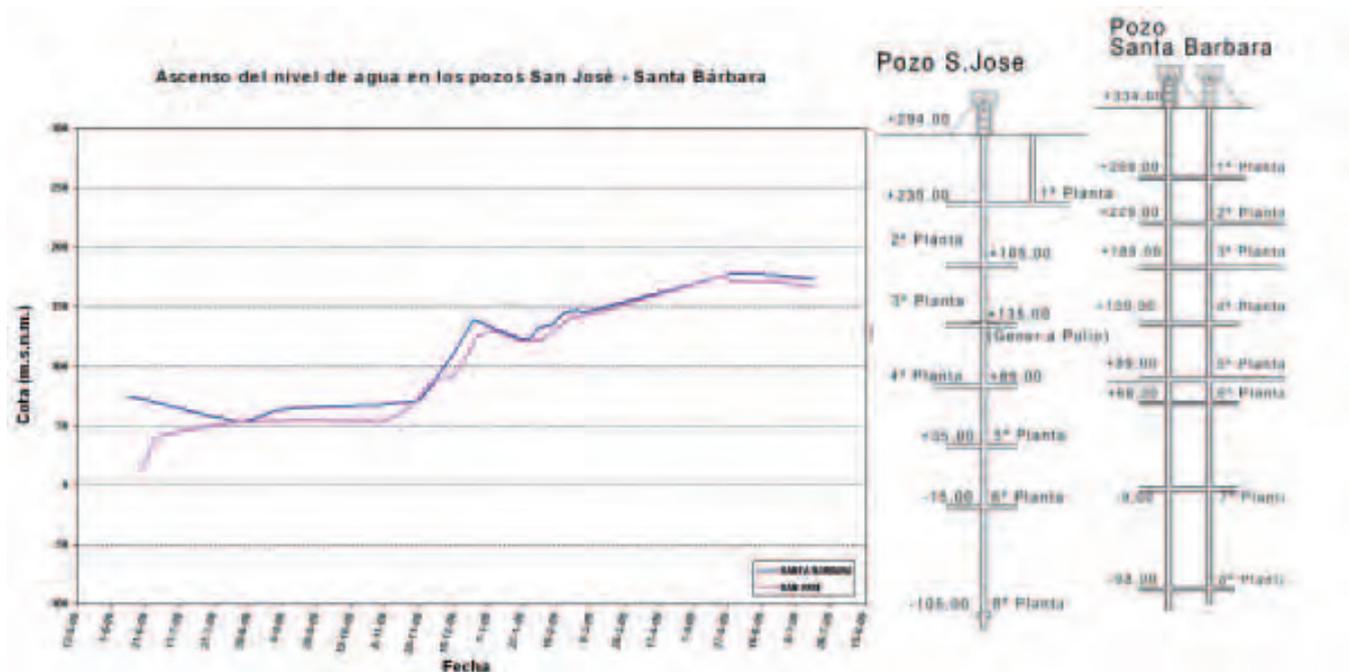


Figura 87. Evolución de la cota absoluta del agua, medida en la caña de los pozos San José (+294 m.s.n.m.) y Santa Bárbara (+334 m.s.n.m.)

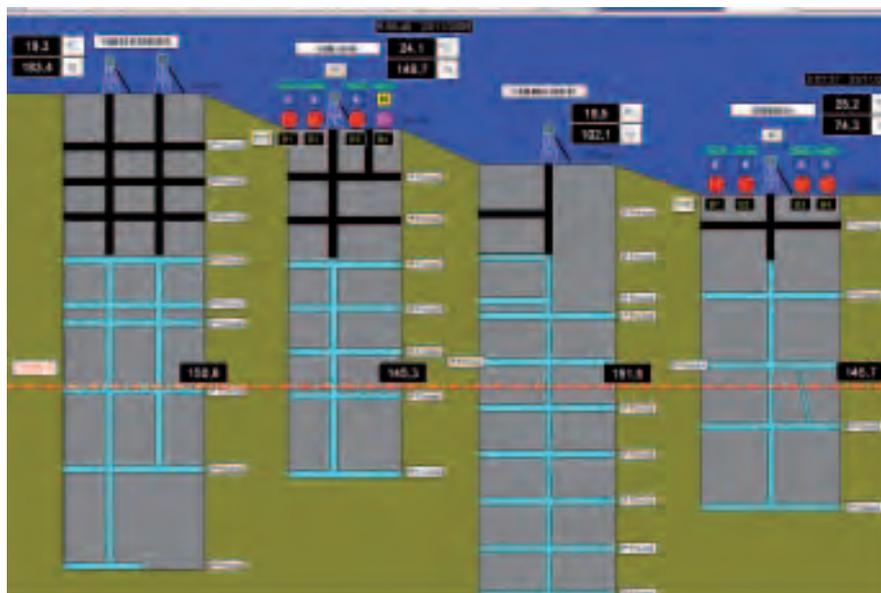


Figura 88. Nivel del agua y temperatura en los cuatro pozos del Turón a fecha 23-11-09, obtenidos a partir del programa de monitorización en continuo, establecido por HUNOSA

5.5 Hidroquímica del agua de mina

En primer lugar se muestran los resultados de medición de parámetros in situ (pH, conductividad eléctrica y temperatura) del agua de los cuatro pozos del valle del Turón. Estos resultados corresponden a muestras tomadas a la máxima cota de inundación en el momento de la medida. Se puede observar que la temperatura es similar en

todos los pozos, siendo ligeramente superior en Figaredo e inferior en Barredo. El pH ronda la neutralidad en todos los casos y, en promedio, tomaría los valores de 7,1, 7,0, 6,9 y 7,2 para Barredo, Figaredo, San José y Santa Bárbara, respectivamente. En cuanto a la conductividad eléctrica, es claramente superior en Figaredo, seguido de Barredo, San José y Santa Bárbara.

Fecha	Temperatura				pH				Conductividad eléctrica			
	Barredo	Figaredo	San José	Sta. Bárbara	Barredo	Figaredo	San José	Sta. Bárbara	Barredo	Figaredo	San José	Sta. Bárbara
1-8-08	19,6	22,5	19,7	20,1	7,04	7,44	6,98	7,29	1594	3620	1528	1274
8-8-08	18,8	22,4	18,6	19,7	7,06	7,29	7,04	7,4	3550	3750	1515	1252
14-8-08	18,5	20,1	18,4	20,0	7,22	7,52	7,28	7,48	1875	3830	1497	1268
22-8-08	18,3	21,1	19,1	20,7	7,29	7,27	7,28	7,55	1721	4950	1518	1245
29-8-08	19,0	22,6	19,3	19,9	7,28	7,40	7,33	7,77	2850	5540	1566	1199
1-9-08	18,5		18,8		7,27		7,29		1927		1475	
5-9-08	18,7	23,0	19,6	18,3	6,96	7,02	7,06	7,64	1858	5400	1307	992
15-9-08	18,6	21,3	18,7	17,8	6,71	7,18	6,93	7,22	1731	5410	1306	973
19-9-08	19,1	22,0	19,5	18,5	7,09	7,05	7,16	7,69	1758	5340	1292	1001
24-9-08	17,6	19,3	16,6	17,0	6,66	6,90	6,96	7,24	1930	5450	1616	1206
2-10-08	18,2	20,5	18,1	17,4	6,81	7,22	6,83	7,52	1760	5210	1645	1215
10-10-08	18,2	20,5	18,0	17,9	7,17	7,25	7,17	7,65	1624	5120	1715	1263
17-10-08	18,0	21,1	19,2	18,2	6,95	7,08	7,06	7,55	1668	4980	1684	1291
24-10-08	18,5	17,8	18,6	18,4	7,64	7,02	7,01	7,35	1513	4550	1594	1223
31-10-08	17,6	16,5	18,2	17,1	8,08	7,48	7,30	7,70	1348	4550	1473	1161
7-11-08	17,9	18,2	18,6	17,7	7,25	6,94	6,84	6,68	1403	4450	1590	1205
14-11-08	17,5	16,9	17,8	16,8	6,88	6,91	6,79	6,90	1394	4590	1574	1161
21-11-08	19,0	18,4	18,9	18,6	7,39	7,05	6,86	7,04	1463	4590	1503	1116
27-11-08	16,0	17,5	16,9	15,4	7,54	7,02	6,83	6,68	1338	5250	1540	1106
5-12-08	17,3	19,1	17,3	15,8	7,20	7,20	7,00	7,64	2770	5120	1522	1273
12-12-08	17,0	17,1	16,3	15,6	7,19	7,20	6,97	7,19	2940	4690	1535	1436
19-12-08	16,8	17,3	18,0	16,4	7,05	6,95	7,03	6,84	1681	3600	1686	1417
29-12-08	16,3	15,9	16,2	15,7	7,70	7,10	6,79	6,88	1580	1871	1224	1792
2-1-09	16,4	16,6	17,4	17,1	7,96	6,67	6,78	9,80	1577	3070	1979	1771
9-1-09	15,0	14,7	16,4	16,4	7,56	7,44	7,10	7,29	1360	3360	1804	1631
16-1-09	16,1	17,1	17,3	17,7	6,77	6,76	6,58	6,62	1755	3490	1729	1611
23-1-09	16,8	17,1	18,3	18,2	6,63	6,75	6,56	6,60	1775	3550	1764	1693
30-1-09	16,8	18,3	17,7	18,5	6,67	6,69	6,60	6,63	1838	3530	1807	1520
6-2-09	15,2	16,4	17,5	15,7	6,95	6,97	6,80	6,91	1528	3500	1875	1496
13-2-09	16,4	16,6	17,6	15,3	6,90	6,75	6,79	6,95	1938	3360	1837	1429
20-2-09	15,0	18,0	17,0	15,5	6,56	6,64	6,67	6,72	1596	3530	1756	1441
27-2-09	15,0	16,5	17,4	15,5	6,54	6,62	6,58	6,62	1530	2960	1832	1507
6-3-09	14,2	16,1	17,1	17,2	7,05	7,02	6,99	6,66	1635	2570	2200	1702
13-3-09	14,40	15,7	17,7	17,6	7,57	7,03	6,89	6,74	1149	1767	2200	1755
20-3-09	15,20	15,7	18,0	17,7	6,90	6,65	6,75	6,77	1486	1745	2220	1640
27-3-09	15,20	15,5	17,6	17,9	6,86	6,72	6,70	6,69	1599	1660	2050	1670
3-4-09	14,40	15,2	17,2	17,8	6,18	6,94	6,79	6,75	1606	1640	2040	1662
23-4-09	14,50	15,4	17,4	16,5	7,34	7,15	6,94	7,12	1420	1685	2120	1450

Tabla 32. Medición de parámetros in situ en el agua de los pozos del Turón, a nivel superficial

En segundo lugar, con el objetivo de caracterizar las aguas de los Pozos Barredo y Figaredo de cara a un posible aprovechamiento del agua de mina para abastecimiento, se realizó un estudio hidroquímico (análisis efectuados por la Unidad de Medio Ambiente de HUNOSA, el Instituto Geológico y Minero de España y la consultora

Ingenieros Asesores, S.A.). Estos análisis se realizaron sobre muestras de agua bombeada del interior de los pozos, tomadas entre marzo de 2003 y marzo de 2009.

En las siguientes tablas (Tabla 33 a 40), se resumen los resultados de algunas de estas campañas de muestreo:

Barredo					
Fecha muestreo	Aceites y Grasas	Conductividad	Hierro	pH	Sólidos en Suspensión
	(mg/l)	(mS / cm)	(mg /l)		(mg/l)
31/03/03	8,5	1610	0,123	8,12	3
23/05/03	0,1	1418	0,068	8,23	1,2
19/02/04	8	1431	0,226	8,46	1,2
25/05/04	0,1	1602	0,092	8,6	1,7
23/06/04	10,5	1585	0,105	8,12	4,2
01/10/04	9,2	1862	0,103	8,02	4
20/12/04	3,6	1721	0,167	7,91	2
16/03/05	0,1	1463	0,125	7,94	0,1
22/06/05	1,2	1815	0,244	8,21	3
16/09/05	0,1	1701	0,077	8,1	1,6
21/12/05	1	1503	0,166	8	2
16/03/06	2,4	1483	0,134	7,84	2

Tabla 33. Análisis de aguas bombeadas del Pozo Barredo (Unidad Medio Ambiente-HUNOSA).

En color rojo se destacan aquellas muestras cuya concentración supera el límite establecido por el Real Decreto 140/2003

Figaredo					
Fecha muestreo	Aceites y Grasas	Conductividad	Hierro	pH	Sólidos en Suspensión
	(mg/l)	(mS / cm)	(mg /l)		(mg/l)
22/01/04	29,5	1670	0,159	8,5	35
19/02/04	0,1	2030	0,155	8,64	24,8
20/05/04	25	2070	0,147	8,96	44,8
23/06/04	15,5	2120	0,315	8,49	23,2
01/10/04	4	2010	0,226	8,41	28
30/11/04	0,1	1901	0,04	8,45	20
20/12/04	6	1821	0,186	8,51	19,3
16/03/05	12	2,23	0,325	8,27	40,8
22/06/05	2,4	2,26	0,49	8,49	36
07/07/05	0,1	1579	0,301	7,73	1,6
16/09/05	0,1	1108	0,042	8,1	0,1
21/12/05	1	1121	0,051	8,1	2

Tabla 34. Análisis de aguas bombeadas del Pozo Figaredo (Unidad Medio Ambiente-HUNOSA)

En color rojo se destacan aquellas muestras cuya concentración supera el límite establecido por el Real Decreto 140/2003

Barredo									
Fecha Muestreo		19/11/07	24/09/08	24/10/08	21/11/08	29/12/08	23/01/09	20/02/09	20/03/09
DQO	mg/l	1	3	1,4	8	13	5	19	17
Cl	mg/l	10	10	10	12,10	13,35	20	16,90	25,10
SO4	mg/l	280	720	412	394	457	903	617	514,99
HCO3	mg/l	758	530	388	548	535	635	439	463,94
CO3	mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0,00
NO3	mg/l	1	0	0	0,66	0,98	1	2,29	2,82
Na	mg/l	201	121	90	75	52	268	168	115,2
Mg	mg/l	66	93	70	69,99	79,51	89	83,09	66,2
Ca	mg/l	102	200	122	154,28	184,5	174	123,3	150,8
K	mg/l	8	12	9	6,41	7,41	21	14,10	13,81
pH		8	7	7,48	7,79	8,08	7,46	7,32	7,49
C.E.	μS/cm	1699	1751	1271	1276	1279	2070	1516	1386
R_S	mg/l	1095	1386	992	875,1	1171	1795	1282	1111
NO2	mg/l	0	0	0	1,43	0,05	0,27	0,98	0,49
NH4	mg/l	0	1	0,13	0,08	0,07	0	0,00	0,00
PO4	mg/l	0	0	0	0,20	0,12	0,13	0,25	0,29
SiO2	mg/l	11	14	12,4	9,36	9,14	9,8	7,80	7,93
Fe	μg/l	193	35140	760	5410	1290	6410	1540	1070
Mn	μg/l	77	2020	590	280	170	1150	290	160
Cu	μg/l	0	0	0	24	3	0	0	0
Zn	μg/l	0	880	50	465	104	440	205	272
Cr	μg/l	0	0	0	6,3	0	3,9	6,5	0,9
Cd	μg/l	0	0	0	0,3	0	0,1	0	0
Pb	μg/l	0	196	0	121,9	0	9,6	0	8,4
As	μg/l	0	0	0	17,1	0	0	3,11	9,11
Se	μg/l	0	0	0	0	0	0	0	0
Hg	μg/l	0	0	0	0	0	0	0	0,00
F	mg/l	0	0	0	0,24	0,19	0,26	0,23	0,20
S	μg/l	1	804	804,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 35. Análisis de las aguas del Pozo Barredo

En color rojo se destacan aquellas muestras cuya concentración supera el límite establecido por el Real Decreto 140/2003

		Figaredo								
Fecha Muestreo		19/12/07	27/05/08	24/09/08	24/10/08	21/11/08	29/12/08	26/01/09	20/02/09	20/03/09
DQO	mg/l	1	1	7	5,7	12	29	1	5	3
Cl	mg/l	8	14	40	34	32,32	17,27	21	18,72	11,21
SO ₄	mg/l	306	358	2250	1990	1781	1110	1425	1455	585,32
HCO ₃	mg/l	668	366	900	730	1035	724	814	607	641,19
CO ₃	mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
NO ₃	mg/l	1	2	5	3	1,04	3,42	2	1,57	1,85
Na	mg/l	91	67	1010	897	809	298	447	495	78,1
Mg	mg/l	75	76	114	100	104,99	117,84	113	165,46	88,1
Ca	mg/l	162	106	180	132	187,25	235,93	233	190,39	241,2
K	mg/l	6	5	14	14	10,36	6,94	11	12,05	5,86
pH		7	8	7	7,73	7,43	7,48	7,39	7,28	6,87
C.E.	μS/cm	1607	1474	5773	4763	3910	2460	3000	2920	2300
R_S	mg/l	910	1046	3995	3294,4	3221,9	2333,7	2654,2	2657,3	1379,1
NO ₂	mg/l	0	0	0	0	1,74	0,08	0,44	0,24	0,73
NH ₄	mg/l	0	0	0	0	1,02	0,54	0,61	0,45	0,25
PO ₄	mg/l	0	0	0	0	0,29	0,20	0,19	0,21	0,20
SiO ₂	mg/l	12	9	14	14,4	11,35	10,55	11,0	11,05	11,21
Fe	μg/l	420	500	10540	3285	5350	2590	2310	2140	1780
Mn	μg/l	116	168	2380	1499	1120	670	970	1530	940
Cu	μg/l	0	0	0	0	22	3	0	0	0
Zn	μg/l	0	0	110	0	259	114	187	126	227
Cr	μg/l	0	0	0	0	5,4	0	2	3,7	0,2
Cd	μg/l	1	0	0	0	0,1	0	0,1	0	0
Pb	μg/l	0	0	0	0	14	0	6,2	0	2
As	μg/l	0	0	0	0	11	0,37	0	0,66	11,64
Se	μg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hg	μg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	mg/l	0	0	0	0	0,35	0,21	0,2	0,30	0,16
S	μg/l	0	0	804	804,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	μg/l	0	0	53	59,6	240,1	306,7	70,42	388,7	157
Zn	μg/l	0	0	110	0	259	114	187	126	

Tabla 36. Análisis de las aguas del Pozo Figaredo

En color rojo se destacan aquellas muestras cuya concentración supera el límite establecido por el Real Decreto 140/2003

Parámetro	Unidades	Valor Paramétrico
Cl	mg/l	250
SO ₄	mg/l	250
NO ₃	mg/l	50
Na	mg/l	200
Fluoruro	mg/l	1,5
Amonio	mg/l	0,5
Cu	mg/l	2
Cr	μg/l	50
As	μg/l	10
Cd	μg/l	5
Fe	μg/l	200
Hg	μg/l	1
Pb	μg/l	25
Se	μg/l	10
Al	μg/l	200
pH	---	9,5
C.E	---	2500

Tabla 37. Parámetros y valores paramétricos según el R.D.140/2003

En lo que respecta al pH, en el Pozo Figaredo varía entre 6,7 y 8, con un valor medio de 7,3. En el Pozo Barredo el pH se encuentra entre 7,9 y 8,1, con un valor medio de 7,5. Como se ve, ambos pozos tienen valores próximos al neutro, con escasas variaciones, más apreciables en el Pozo Barredo.

En cuanto a la conductividad eléctrica, el agua del Pozo Figaredo oscila entre 1474 y 5773 μS/cm, con un valor medio de 3134. El agua del Pozo Barredo varía en este parámetro entre 1271 y 2070 μS/cm, con un valor medio de 1531. Mientras que la conductividad eléctrica se mantiene en general para el pozo Barredo entre 1000 y 2000 μS/cm, en el Pozo Figaredo (San Inocencio) se han detectado conductividades mucho más altas y una mayor fluctuación. Se observa además un descenso de estas conductividades a partir del 2008, lo que puede ser debido a la mezcla con el agua del Pozo Barredo, de conductividad menor, durante la inundación de ambos pozos.

El agua de ambos pozos sobrepasa en ocasiones, por sus altas concentraciones los límites de hierro, sulfatos y manganeso, aunque más acusadamente la correspondiente a Figaredo. Este pozo presenta un alto contenido de sólidos en suspensión y disueltos (como indica su elevada conductividad eléctrica), destacando los elevados contenidos en sodio, cobre, aluminio y en algunas muestras, aceites y grasas. Por su parte el Pozo Barredo presenta en algunas muestras altas concentraciones de plomo y arsénico.

Para cumplir el R.D. 140/2003, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad de aguas para consumo humano, la Directiva 75/440/CEE marca tres tipos de tratamientos:

- **Tipo A1:** Requiere un tratamiento físico simple (TFS, que consiste en un desbaste y una decantación), seguido de una desinfección.
- **Tipo A2:** Requiere un tratamiento físico normal (TFN, que consiste en un TFS seguido por un desarenado por filtración y una predecantación), seguido por un tratamiento químico normal (TQN, consistente en una preoxidación mediante dosificación de un agente oxidante y una coagulación o floculación) y una desinfección final.
- **Tipo A3:** Requiere un tratamiento físico intensivo (TFI, en el que tras el TFN se realiza una microfiltración, una ultrafiltración y/o una osmosis inversa), seguido de un tratamiento químico intensivo (TQI, que consiste en un TQN seguido de una oxidación con ozono, de una electrodiálisis y/o de un intercambio) para finalizar, como en los otros tratamientos, con una desinfección.

A partir de los anteriores análisis y aplicando las exigencias de la Directiva 75/440/CEE, actualmente en vigor, **en cuanto a los tratamientos previstos para el agua bruta de estos pozos si se destinase al abastecimiento humano, se deduce que, debido a los altos contenidos en ambos pozos de hierro y manganeso, habría que aplicarles un tratamiento tipo A3.**

En todo caso, sería deseable realizar análisis periódicos, especialmente del agua del pozo Barredo, desde el que se plantea el aprovechamiento energético del embalse minero, al objeto de caracterizar debidamente la calidad de sus aguas, a la vista de la *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, y del Real*

Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano

El estudio de calidad que durante el último año se ha llevado a cabo ha determinado que se trata de aguas bicarbonatado-sódicas (ver Figura 89), que en ningún caso bajan de pH 7 y no provocan problemas de corrosión en tuberías. El problema principal que afecta a las aguas es su elevada dureza, que en algunos casos llega a superar los 100° franceses y que impide la utilización directa de las aguas de mina como fuente fría de la bomba de calor. Para solventar este problema se pueden colocar intercambiadores de calor intermedios (Cordero et al., 2009).

Los anteriores análisis corresponden al agua bombeada a una misma cota, normalmente próxima a la interfase aire-agua. Debe tenerse en cuenta, no obstante, la estratificación hidroquímica que con frecuencia tiene lugar en las minas subterráneas inundadas. Las muestras tomadas en la superficie del agua dentro de la caña de los pozos parcialmente inundados no pueden considerarse como representativas de la calidad de toda la columna de agua. Es más factible que se produzca esta estratificación en sistemas de lenta recuperación con pocas entradas y salidas de agua, ya que las que penetran desde arriba, más superficiales y menos mineralizadas, ocupan la parte superior de la columna, mientras que aquellas más mineralizadas (con más sólidos disueltos) tienden a permanecer en el fondo de la misma. La estratificación suele desaparecer cuando se produce una alteración por bombeo o cuando el nivel piezométrico alcanza una salida del sistema, como puede ser una antigua galería (Nuttall y Younger, 2004).

Para evaluar si existe estratificación en la columna del pozo Barredo, se utilizó una sonda multiparamétrica mod. Aqua Troll, de 18 mm de diámetro, capaz de resistir las presiones correspondientes a la columna de agua en profundidad, dentro de la caña del pozo y que registra cada minuto (durante su descenso) los siguientes parámetros: tiempo, profundidad, presión, conductividad eléctrica, densidad del agua, sólidos disueltos totales, salinidad y resistividad del agua. Los perfiles de temperatura, conductividad, sólidos disueltos y salinidad obtenidos tras hacer descender la sonda 254 m en el pozo Barredo, estando su nivel de agua a cota +147 m, se muestra en la siguiente figura (Figura 90).

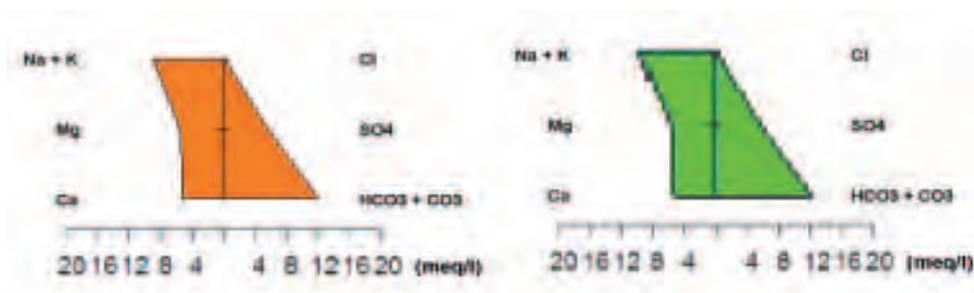


Figura 89. Diagramas de Stiff correspondientes al agua de Barredo en época seca (izda.) y de lluvias (dcha.) (Cordero et al., 2009)

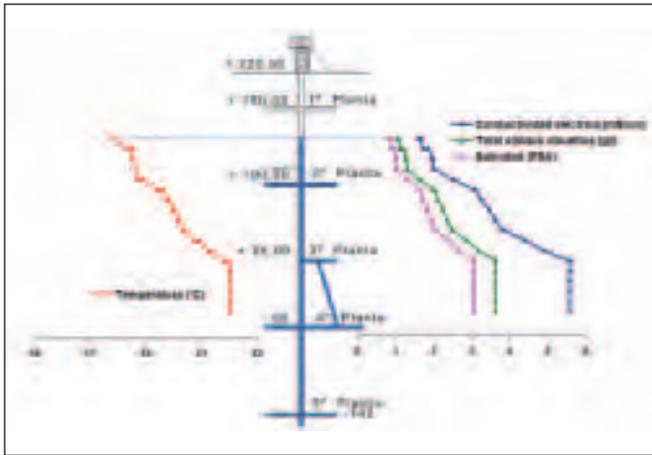


Figura 90. Perfiles de varios parámetros registrados con la sonda Aqua Troll a lo largo de la caña del pozo Barredo

Se observa que los perfiles acusan cambios a la altura de las plantas del pozo atravesadas (2ª y 3ª) y que todos los parámetros representados van aumentando en magnitud al hacerlo la profundidad hasta llegar a la altura de 3ª planta, a partir de la cual se estabilizan. Los perfiles de conductividad, sólidos disueltos y salinidad son análogos, como es obvio, pues los parámetros que representan están muy relacionados. La temperatura aumenta desde unos 17 °C en contacto con la atmósfera hasta 22°C a partir de 3ª planta.

5.5.1 Temperatura del agua

En la figura 91 se compara la evolución de la temperatura del agua medida a nivel superficial en la caña de los pozos Barredo y Figaredo.

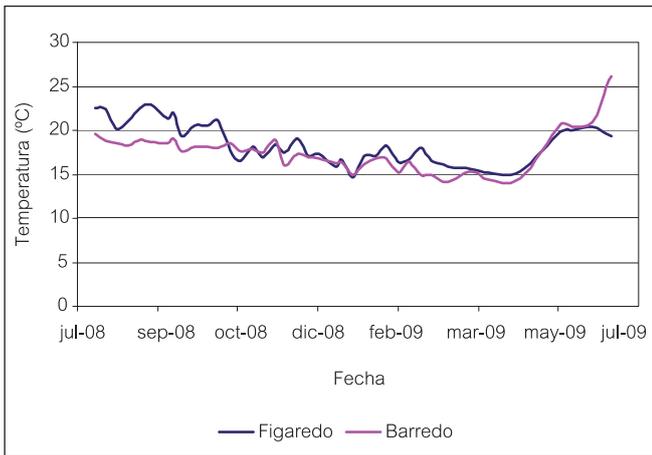


Figura 91. Evolución de la temperatura en la caña de los pozos

En el Pozo Figaredo los valores mínimo y máximo de temperatura observados son de 14,7 y 23 °C, respectivamente, con un valor medio de 18,5 °C. La temperatura del agua de inundación del pozo Barredo varía entre 14,2 y 26,1 °C con un valor medio de 17,6 °C. Los valores de temperatura de las muestras tomadas (del agua más superficial de la caña del pozo), han seguido un ligero descenso a medida que ha ido ascendiendo el nivel de agua desde que se empezó a medir el 1 de agosto de 2008. Sin embargo, a partir del mes de Abril esta temperatura a

comenzado nuevamente a subir en ambos pozos, alcanzando valores históricos de 26°C en el Pozo Barredo.

De cualquier forma, hay que tener en cuenta que la temperatura de la lámina superior de agua en la caña de los pozos (que es de donde se toman las muestras de agua para medir estos parámetros), se ve muy influenciada por la temperatura ambiente, y esta influencia disminuye al ir descendiendo de cota, como ya se ha visto en el apartado anterior.

Resulta fundamental conocer el perfil térmico del pozo así como su comportamiento a lo largo del tiempo y con ese objetivo se ha llevado un control periódico de la temperatura del agua desde el comienzo de la inundación. Este perfil ha permitido conocer las particularidades del flujo térmico asociado al pozo minero y establecer que la temperatura del agua extraída del pozo mantendrá una temperatura de entre 19°C y 25°C, idónea para el funcionamiento de los equipos de bomba de calor.

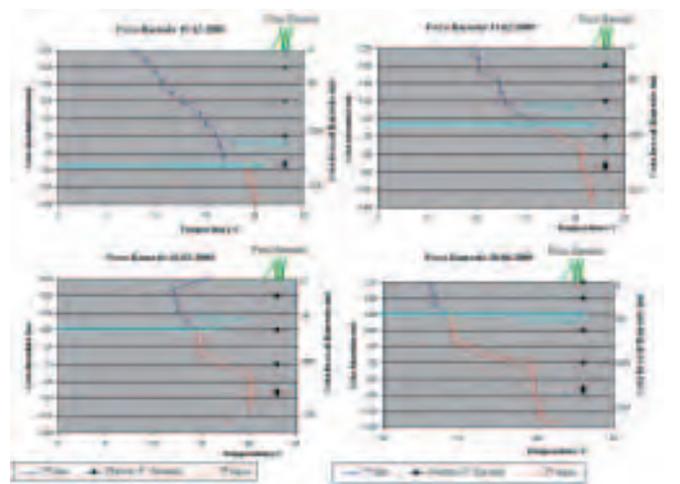


Figura 92. Perfiles térmicos Pozo Barredo

Antes de adquirir la sonda multiparamétrica comentada en el apartado anterior, los perfiles térmicos fueron realizados en la caña del Pozo Barredo tomando muestras a varias profundidades y midiendo en superficie. Como la variabilidad de estos perfiles a lo largo del tiempo es elevada (figura anterior), en la Figura 93 se observa la tendencia de las temperaturas máxima y mínima, y de la media, para valores tomados entre diciembre de 2008 y junio de 2009. En diciembre de 2008 el nivel de agua en la caña del pozo estaba a -29,30 m.s.n.m., mientras que en junio el nivel estaba a 162 m.s.n.m. Actualmente, y como se observa en la figura, el nivel del agua se encuentra a 141,6 m.s.n.m.

Puede observarse que las temperaturas se mantienen dentro de un intervalo pequeño a cotas más profundas (entorno a 20°C), apareciendo mayores fluctuaciones al acercarse a la superficie, ya que en estas zonas altas la temperatura del agua estará más influenciada por la temperatura atmosférica. En cualquier caso, se observa que la temperatura media aumenta con la profundidad.

También se observa un aumento de las temperaturas máximas entorno a los 100 m de profundidad desde el brocal del pozo (120 m.s.n.m), lo cual puede deberse a

que en esta zona están colocadas las bombas, cuyo funcionamiento provocan un aumento de la temperatura del agua y presumiblemente activan células convectivas.

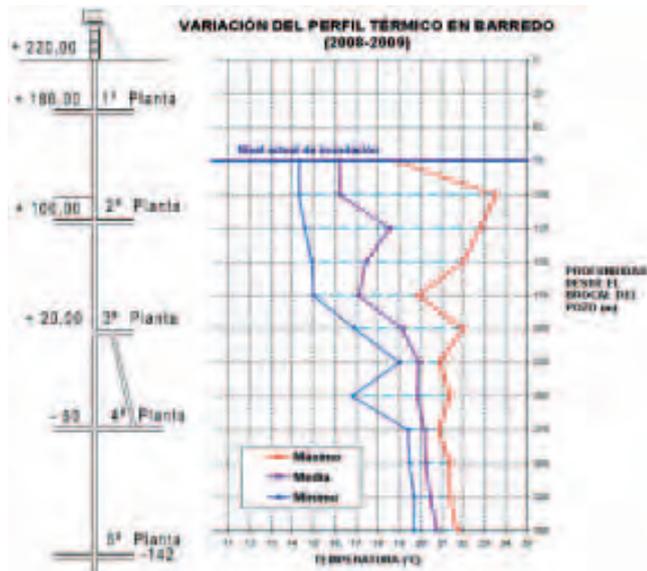


Figura 93. Perfil térmico del Pozo Barredo. Se observa la tendencia de la temperatura media, así como los intervalos entre los que se ha movido la temperatura para cada cota

5.6 Modelo térmico

5.6.1 Descripción litológica

Para realizar el Modelo Térmico del pozo Barredo nos basamos en el modelo de la Media Geométrica, tomando, como se vio anteriormente, la conductividad térmica de la roca como una función de la porosidad de la misma. Sabemos que la porosidad se puede determinar a partir de la densidad total del terreno (ρ_b), de la densidad de la matriz (ρ_m) y la densidad del fluido que rellena los poros (ρ_f):

$$\phi = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m - \rho_f}$$

Y que la conductividad total del terreno, que según este modelo sigue la expresión: $k = k_m^{(1-\phi)} \cdot k_f^\phi$, será función de la conductividad de las partículas sólidas del mismo (o matriz), k_m , y de la conductividad del fluido que rellena los poros, k_f .

Con el fin de determinar la porosidad y la conductividad térmica de las rocas que constituyen la columna estratigráfica del Pozo Barredo se realizaron dos campañas de campo (el 10/07/09 y el 16/07/09) en las que se tomaron 22 muestras de las rocas que constituyen dicha columna estratigráfica del Pozo Barredo en varios puntos siguiendo el recorrido marcado por García-Loygorri (1971) que sigue la carretera de Santa Cruz a Moreda (Figura 95).

De todas las muestras tomadas, sólo trece de ellas pudieron ser estudiadas en lámina delgada al microscopio

(por su adecuada resistencia), realizándose para cada una de ellas un pequeño informe en el que se describe su composición mineralógica, su textura y sus principales componentes mineralógicos. A continuación se incluye una breve explicación de los principales paquetes que afectan al Pozo Barredo, prestando especial atención a las características de las capas que forman dichos paquetes. Como se dijo en el apartado de Antecedentes, en el pozo Barredo se explotaron los paquetes M³ Luisa, San Antonio, Generalas y Caleras. En la zona de estudio, estos paquetes tienen un buzamiento prácticamente vertical, de forma que aproximadamente aparecen paralelos a la caña del pozo (Figura 98), quedando ésta inmersa totalmente en el paquete Caleras. Sin embargo las labores se extienden, como ya se dijo, hacia el norte y hacia el sur, atravesando todos estos paquetes. En la Figura 94 se muestra la columna estratigráfica simplificada de los paquetes que se explotaron en el Pozo Barredo, que aparece más detalladamente explicada en la Tabla 38.

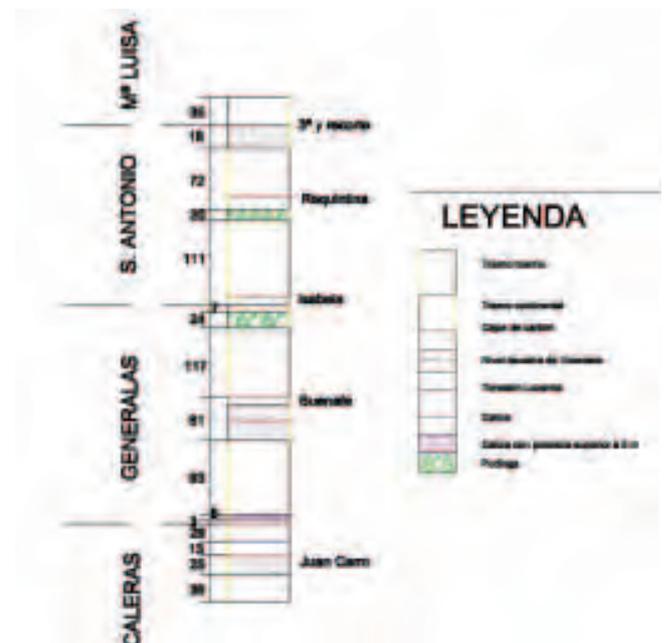


Figura 94. Columna estratigráfica del Pozo Barredo

A continuación se da una breve explicación de cada uno de estos paquetes (García-Loygorri, 1971), adjuntándose, cuando corresponda, las fichas resultado del análisis al microscopio de cada una de las muestras:

- **Paquete Caleras:** En la zona de estudio encontramos el tramo marino superior de este paquete, con una potencia en esta zona de 104. Este tramo se caracteriza por la presencia de una capa de carbón, denominada Juan Carro, de gran continuidad, que a techo presenta una capa delgada de caliza de 1 m de espesor que rompe la alternancia de capas más o menos potentes de areniscas y pizarras. Debido a la falla de la Revanilla que afecta al paquete Generalas en la zona de toma de muestras, este paquete no es observable en el recorrido que une Santa Cruz con Moreda, por lo que no se tomaron muestras de estas litologías,

pero pueden asemejarse con las litologías marinas de otro de los paquetes (por proximidad nosotros consideramos que estas litologías son semejantes a las estudiadas en el tramo basal del Paquete Generalas).

- **Paquete Generalas:** Tiene un espesor, tal y como se observa en la columna estratigráfica, de 304 m. En su base lleva un nivel marino de unos 100 m que se inicia con una caliza, conocida como caliza de la Torala, muy continua y con un espesor, en esta zona, de 6 m. Hacia arriba, este nivel marino queda interrumpido por la presencia de un carbonero con suelo de vegetación. Sobre este nivel marino de 93 m de potencia, en

el que se alternan capas de areniscas (muestra 13) y pizarras (muestra 12), con predominio de las segundas, descansa un tramo continental de unos 61 m, predominantemente arenoso y con 3 pasos de carbón. El paquete lo cierra un nuevo tramo marino de 117 m de potencia, en el que nuevamente se alternan capas arenosas (muestra 13) con pizarras (muestra 12), y en el que aparece un paso de carbón en su parte más baja. La culminación del paquete es una pudinga de 24 m de espesor. De las muestras tomadas, la 11a corresponde a la matriz de dicha pudinga y la 11b a los cantos.

Descripción petrográfica

DATOS DE REFERENCIA:

Nombre comercial:	Nº referencia: MUESTRA 11a
Tipo de muestra (número, tamaño, forma...): LD	
Acabado superficial (fractura, sierra...): 30 µm, con cubre	
Color (muestra sana, alterada...):	
Nombre petrográfico (clase de roca):	
Situación geográfica (local, general...):	
Situación geológica (formación, edad...):	

COMPOSICIÓN:

Componentes petrográficos ¹		%	Composición mineral ¹		%
Granos o cristales:	Cuarzo	53			
	Fragmentos de Roca	43			
Fase de unión:	Matriz Detrítica Limoso-Arcillosa	2			
Otros:	Micas + Opacos	2			
Vacíos ² :					

¹ Porcentaje obtenido por: comparación de cartas visuales, contador de puntos, otros:

² Espacios vacíos observados al microscopio óptico de polarización, otros:

TEXTURA MICROSCÓPICA:

Tipo de textura:	Arenosa (arena media)
Tamaño (grano/cristal):	400 µm para le cuarzo y hasta 500 para los fragmentos de roca
Forma (grano/cristal):	Subeuhedral-subangulosa (cuarzo, deformada en los fragmentos de roca)
Fase de unión / Bordes:	Apenas existe matriz detrítica generada por la alteración de los fragmentos de roca
Espacios vacíos:	No observables
Orientación	no presenta
Distribución	Clasificación media
Estructuras:	No presenta
Discontinuidades:	No presenta, a excepción de microfracturas selladas intragranulares en el cuarzo, definidas por inclusiones fluidas secundarias
Alteración:	Moderada en los fragmentos de roca
Otras características:	Nada destacable

DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES Y ELEMENTOS:

Componente	Descripción petrográfica
Cuarzo	Mineral primario esencial de la fracción detrítica de mayor tamaño. El hábito varía de subanguloso a subredondeado. Predominan las variedades monocristalinas con respecto a las policristalinas, y la extinción recta con respecto a la ondulante, aunque puede aparecer cualquier combinación. El tamaño medio de grano está en torno a 380 µm. Como se puede apreciar en la Fig. 1, el cuarzo presenta abundantes inclusiones fluidas secundarias, alineadas según planos de fractura ya cerrados (intragranulares) y también inclusiones minerales de filosilicatos y opacos principalmente.
Fragmentos de roca	Son de naturaleza metamórfica y en esta muestra llama la atención el avanzado grado de deformación que han adquirido (Fig. 2). Al observarlos con LPA y gran aumento, se concluye que los filosilicatos que los constituyen de forma mayoritaria poseen una intensa alteración. También aparecen, aunque en cantidades muy poco significativas, algún agregado de chert.
Opacos	De forma accesoria, se ha observado la presencia de: Moscovita: partículas o granos bien conservados de más de 500 µm (Fig. 3) Agregados de cuarzo-sericita (Fig. 4) Opacos, con inclusiones minerales en cuarzo, escasos y de muy pequeño tamaño.

RESUMEN DE RESULTADOS:

Clasificación petrográfica:	Litarenita (Filarenita)	
Composición	- mineral:	cuarzo, fragmentos de roca, moscovita y opacos
	- petrográfica:	cuarzo y fragmentos de roca
Textura	- tipo de textura:	arenosa
	- tamaño de grano:	400 µm para el cuarzo
Otras características distintivas:	Esta muestra configura la matriz de un conglomerado silíceo	

FIGURAS (esquemas, dibujos, fotografías, etc.)

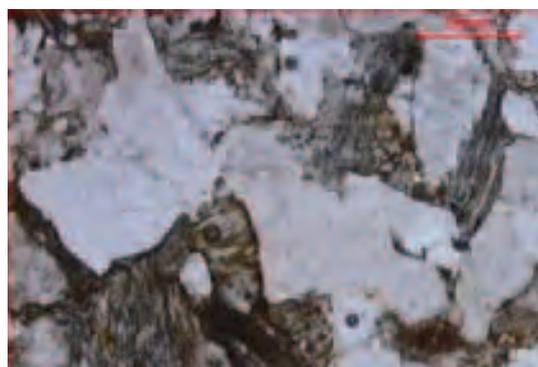


Figura 1. 10x, LPNA

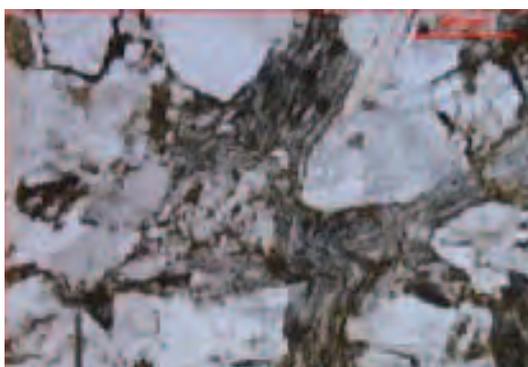


Figura 2. 10x, LPNA

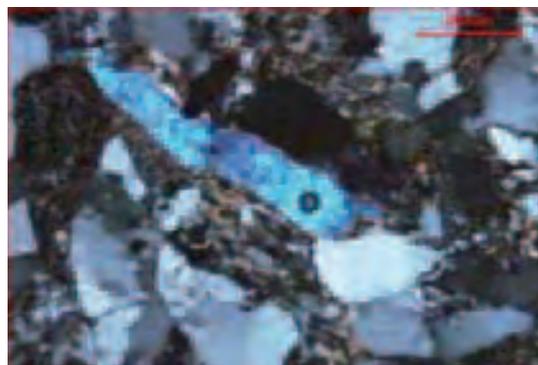


Figura 3. 10x, LPA

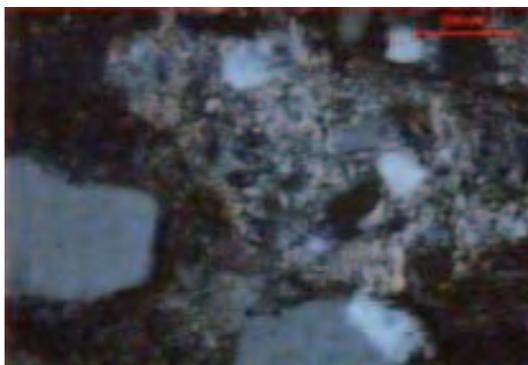


Figura 4. 20x, LPA

Descripción petrográfica**DATOS DE REFERENCIA:**

Nombre comercial:	Nº referencia: MUESTRA 11b
Tipo de muestra (número, tamaño, forma...): LD	
Acabado superficial (fractura, sierra...): 30 µm, con cubre	
Color (muestra sana, alterada...):	
Nombre petrográfico (clase de roca):	
Situación geográfica (local, general...):	
Situación geológica (formación, edad...):	

COMPOSICIÓN:

Componentes petrográficos ¹			Composición mineral ¹	
		%		%
Granos o cristales:	Cuarzo	96		
	Fragmentos de Roca	2		
Fase de unión:	Matriz Detrítica Limoso-Arcillosa	1		
Otros:	Micas + Opacos	1		
Vacios ² :				

¹ Porcentaje obtenido por: comparación de cartas visuales, contador de puntos, otros:

² Espacios vacíos observados al microscopio óptico de polarización, otros:

TEXTURA MICROSCÓPICA:

Tipo de textura:	Arenosa blastopsanítica
Tamaño (grano/cristal):	Aproximadamente 160 µm
Forma (grano/cristal):	Subeuhedral (recristalizada)
Fase de unión / Bordes:	Inexisatente (<1%)
Espacios vacíos:	No presenta
Orientación	Identificable por la deformación del cuarzo
Distribución	Clasificación media-buena
Estructuras:	No presenta
Discontinuidades:	No presenta
Alteración:	Avanzada de la moscovita
Otras características:	Recristalización parcial del cuarzo. Por la deformación orientada de los granos, es posible conocer la dirección del máximo esfuerzo

DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES Y ELEMENTOS:

Componente	Descripción petrográfica
	Esta muestra procede del canto de naturaleza silícea de un conglomerado oligonítico conocido localmente como “Pudinga de Genralas”. Al igual que para la muestra 6b, se trata de una muestra prácticamente monomineral, en la que el cuarzo constituye entorno al 95%, siendo el resto pequeñas cintas micáceas y filosilicatos alterados. La practica totalidad de las consideraciones realizadas en la descripción de la muestra 6b serían aplicables a este caso, con la única excepción de un tamaño medio de grano inferior.
Cuarzo	Granos, en su mayor parte, monocristalinos y con extinción ondulante (Fig. 1). Los contactos entre ellos, si bien más o menos netos, aparecen suturados (Fig. 2). Es un cuarzo sano, con moderadas inclusiones minerales y sin apenas inclusiones fluidas observables. Su tamaño medio de grano se podría fijar en 160 µm.
Moscovita	Relativamente escasa, acompaña al cuarzo. No presenta orientación preferente alguna, los individuos son de pequeño tamaño (Fig. 3) con 130 µm de eje mayor, y generalmente están alterados o en alteración. Existen además, otros filosilicatos de carácter no tan laminar como la moscovita, que se distinguen en los espacios intergranulares del cuarzo, a modo de reductos de una matriz detrítica. En ocasiones, incluso, se observa que van acompañados de algún pequeño cristal de calcita (Fig. 4)
Opacos	Muy escasos y no identificables.

RESUMEN DE RESULTADOS:

Clasificación petrográfica:		Cuarciarenita (alternativamente, ortomarcita)
Composición	- mineral:	cuarzo, sericita, moscovita y opacos
	- petrográfica:	cuarzo
Textura	- tipo de textura:	arenosa blastopsanítica
	- tamaño de grano:	Aproximadamente 160 µm
Otras características distintivas:		La muestra es representativa del canto de un conglomerado conocido localmente como “Pudinga de Generalas”

FIGURAS (esquemas, dibujos, fotografías, etc.)



Figura 1. 5x, LPA



Figura 2. 50x, LPA



Figura 3. 20x, LPA



Figura 4. 20x, LPA

Descripción petrográfica**DATOS DE REFERENCIA:**

Nombre comercial:	Nº referencia: MUESTRA 12
Tipo de muestra (número, tamaño, forma...): LD	
Acabado superficial (fractura, sierra...): 30 µm, con cubre	
Color (muestra sana, alterada...):	
Nombre petrográfico (clase de roca):	
Situación geográfica (local, general...):	
Situación geológica (formación, edad...):	

COMPOSICIÓN:

Componentes petrográficos ¹		%	Composición mineral ¹		%
Granos o cristales:	Opacos	1			
Fase de unión:	Matriz	98			
Otros:					
Vacíos ² :	Fracturas abiertas	1			

¹ Porcentaje obtenido por: comparación de cartas visuales, contador de puntos, otros:

² Espacios vacíos observados al microscopio óptico de polarización, otros:

TEXTURA MICROSCÓPICA:

Tipo de textura:	Lutítica limosa
Tamaño (grano/cristal):	< 60 µm
Forma (grano/cristal):	Subredondeado cuando es observable
Fase de unión / Bordes:	La totalidad de la muestra podría considerarse como tal
Espacios vacíos:	Fracturación abierta
Orientación	No presenta
Distribución	No procede
Estructuras:	No presenta
Discontinuidades:	Meso y microscópicas escasas
Alteración:	La matriz y el cuarzo son el resultado de un proceso de alteración
Otras características:	Se observa calcita bien conservada

DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES Y ELEMENTOS:

Componente	Descripción petrográfica
	Se trata de una limolita en la que los granos observables e identificables con microscopía óptica (los próximos al límite con el tamaño arena) son de cuarzo y, en mucha menor medida, de calcita. En la configuración de la muestra predomina la matriz detrítica, formada por filosilicatos de tamaño demasiado pequeño para poder ser identificados por ésta técnica. Una imagen representativa de la textura lutítico-limosa de la roca se presenta en la Fig. 1.
Cuarzo	Aparece en tamaños de grano entre 30 y 60 μm , pudiendo establecer un tamaño medio entorno a 50 μm (Fig. 2). Se trata de un cuarzo moderadamente rodado, sucio, con inclusiones minerales, y muy fracturado. Todos los granos son monocristalinos y presentan extinción recta.
Calcita	Los granos de carbonato cálcico son mucho menos habituales que lo de cuarzo, y aparecen en forma de cristales euhedrales-subeuhedrales, a veces maclados, dispersos en la matriz detrítica (Fig. 3) y de tamaño similar al del cuarzo.
Opacos	Presumiblemente se trata de materia orgánica. Son granos aislados escasos y elípticos o laminares (Fig. 4) cuyo tamaño puede llegar a las 100 μm .
Matriz	Formados por filosilicatos (¿sericita?) no identificables

RESUMEN DE RESULTADOS:

Clasificación petrográfica:	Lutita (Limolita)	
Composición	- mineral:	cuarzo, calcita, filosilicatos y opacos
	- petrográfica:	> 75% matriz, no influye la mineralogía en la clasificación
Textura	- tipo de textura:	Lutítico limosa
	- tamaño de grano:	< 60 μm
Otras características distintivas:	Nada destacable	

FIGURAS (esquemas, dibujos, fotografías, etc.)



Figura 1. 5x, LPA

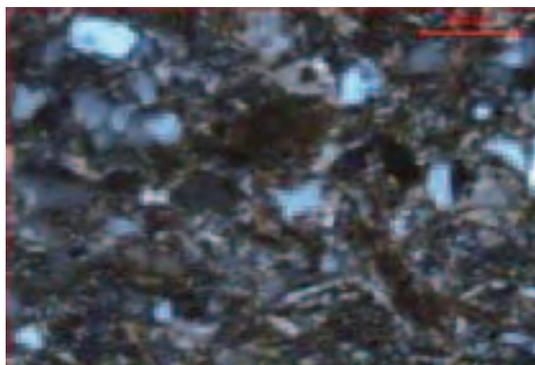


Figura 2. 20x, LPA

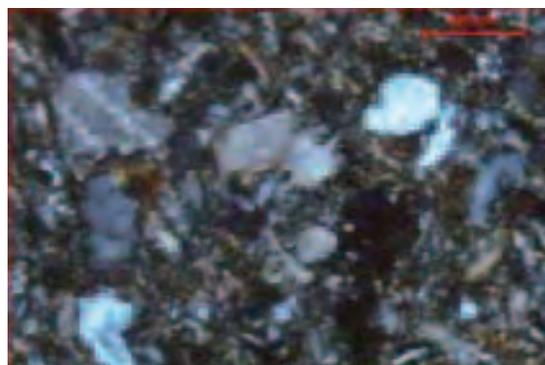


Figura 3. 20x, LPA



Figura 4. 10x, LPNA

Descripción petrográfica**DATOS DE REFERENCIA:**

Nombre comercial:	Nº referencia: MUESTRA 13
Tipo de muestra (número, tamaño, forma...): LD	
Acabado superficial (fractura, sierra...): 30 µm, con cubre	
Color (muestra sana, alterada...):	
Nombre petrográfico (clase de roca):	
Situación geográfica (local, general...):	
Situación geológica (formación, edad...):	

COMPOSICIÓN:

Componentes petrográficos ¹			Composición mineral ¹	
		%		%
Granos o cristales:	Cuarzo	30		
	Fragmentos de roca	23		
	Calcita	37		
Fase de unión:	Matriz limosa	7		
Otros:	Opacos	2		
Vacíos ² :	No observados			

¹ Porcentaje obtenido por: comparación de cartas visuales, contador de puntos, otros:

² Espacios vacíos observados al microscopio óptico de polarización, otros:

TEXTURA MICROSCÓPICA:

Tipo de textura:	Arenosa
Tamaño (grano/cristal):	200 µm
Forma (grano/cristal):	Subeuhedral
Fase de unión / Bordes:	Matriz limosa escasa
Espacios vacíos:	No observados
Orientación	No definida, a excepción de lo citado en el último punto
Distribución	Clasificación media-buena
Estructuras:	No presenta
Discontinuidades:	No presenta
Alteración:	Evidente, sólo de los fragmentos de roca
Otras características:	En la parte central de la muestra, existe una banda de 2,5 mm muy arcillosa, que no se ha considerado hasta lo aquí expuesto por ser menos representativa.

DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES Y ELEMENTOS:

Componente	Descripción petrográfica
Cuarzo	Aunque, como en muestras anteriores, predominan los individuos monocristalinos sobre los policristalinos, la proporción relativa de estos últimos en esta muestra es susceptiblemente mayor que en el resto. Aparece el cuarzo en forma de granos subeudrales (angulosos, muy poco rodados), algo alterados por los bordes y parcialmente reemplazados por filosilicatos de neoformación (Fig. 1). Presentan moderadas inclusiones fluidas secundarias y escasas inclusiones minerales. Su tamaño medio se puede establecer en 220 µm.
Calcita	Se presenta bajo dos formas, como en otras ocasiones: A. Cristales maclados B. Agregados esparíticos o microesparíticos. Ambos con hábito subredondeado y con tamaños medios algo inferiores a los del cuarzo (Fig. 2). Predomina el tipo B.

Fragmentos de roca	Son metamórficos y se encuentran algo alterados. Están formados por filosilicatos, y en mucha menor medida, por cuarzo. Suelen estar deformados, aunque sin orientar (Fig. 3)
Opacos	Son muy escasos, y pueden referir similares consideraciones que los componentes anteriores
Otros	Se ha observado presencia de algún grano aislado y sin significación, de mica verde y un bioclasto de carbonato (Fig. 4). En su parte central, la muestra posee una pasada lutítica (Fig. 5)

RESUMEN DE RESULTADOS:

Clasificación petrográfica:	Litarenita (Filarenita)	
Composición	- mineral:	Cuarzo, calcita, fragmentos de roca, micas y opacos
	- petrográfica:	cuarzo y fragmentos de roca
Textura	- tipo de textura:	Arenosa
	- tamaño de grano:	Aproximadamente 200 µm
Otras características distintivas:	Se ha observado un bioclasto, aparentemente marino, lo que no encaja con el medio continental supuesto para esta roca.	

FIGURAS (esquemas, dibujos, fotografías, etc.)

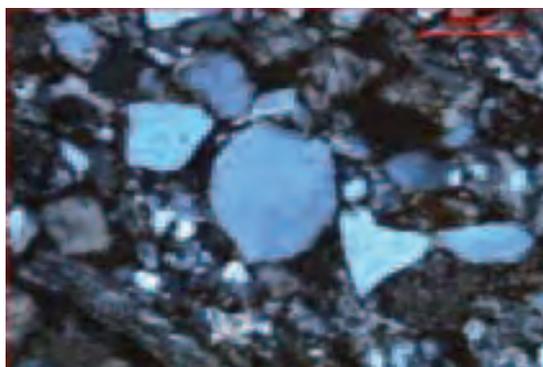


Figura 1. 10x, LPA

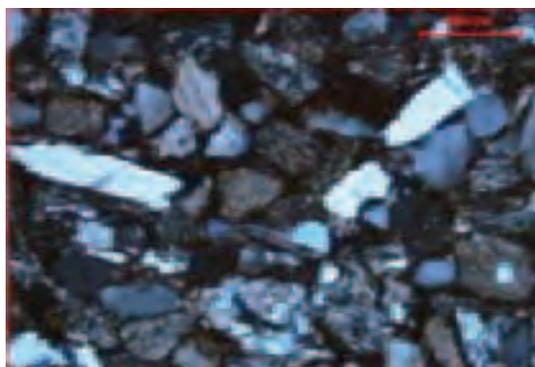


Figura 2. 10x, LPA

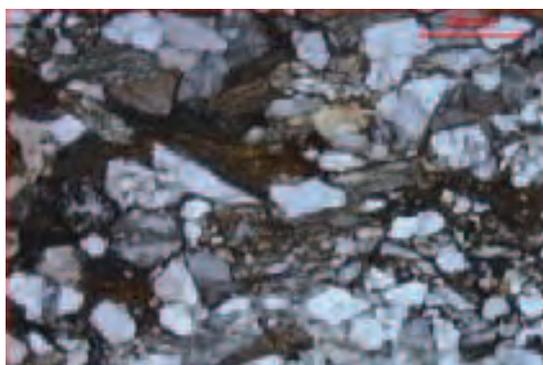


Figura 3. 5x, LPNA

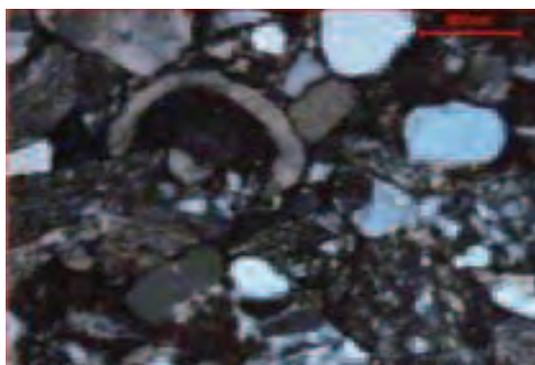


Figura 4. 10x, LPNA

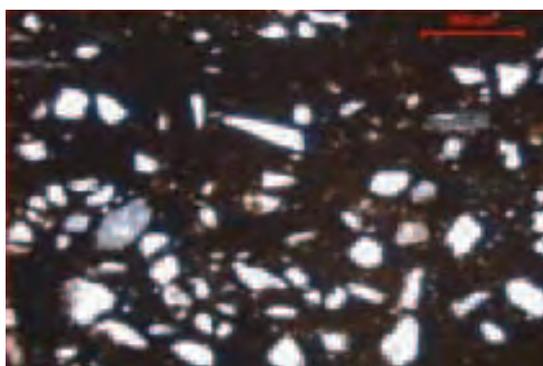


Figura 5. 5x, LPNA

- **Paquete San Antonio:** Descansa directamente encima de la pudinga con una potencia, que oscila entre 240 y 362 m (228 m en la columna estratigráfica estudiada). En su base el paquete está constituido por un grupo de cuatro capas o carboneros insertos en unos 50 m de sedimentos arenosos, con techo marino de unos 60 m de potencia. Todo el tramo marino se caracteriza por la alternancia de areniscas (muestra 10) y lutitas. Mientras que la litología de las areniscas es prácticamente constante durante todo el tramo, a excepción de las areniscas que determinan el final de los primeros 50 m (muestra 9), que marcan un cambio de ritmo en la sedimentación de las lutitas, ya que se distinguen dos facies para esta litología, una en el

primer tramo (muestra 8) y otra para el tramo final de 60 m (muestra 7). El final de este ambiente marino, claramente regresivo, lo constituye una segunda pudinga silícea de 6 m de espesor (muestra 6a, matriz, y 6b, cantos). Sobre la pudinga existe un nuevo tramo con capas y carboneros de 14 m de potencia y con una facies muy arenosa, conocida con el nombre de Arenisca de la Voz (muestra 4) en la que se intercalan delgados niveles pizarrosos (muestra 3). El carácter marino de la parte superior del Paquete San Antonio parece ir decreciendo hacia arriba, hasta imponerse una facies continental de carácter arenoso (muestra 2), culminando el paquete con una pequeña capa lutítica (muestra 1).

Descripción petrográfica

DATOS DE REFERENCIA:

Nombre comercial:	Nº referencia: MUESTRA 1
Tipo de muestra (número, tamaño, forma...): LD	
Acabado superficial (fractura, sierra...): 30 µm, con cubre	
Color (muestra sana, alterada...):	
Nombre petrográfico (clase de roca): Lutita	
Situación geográfica (local, general...):	
Situación geológica (formación, edad...):	

COMPOSICIÓN:

Componentes petrográficos ¹		%	Composición mineral ¹		%
Granos o cristales:	Cuarzo	12			
	Moscovita	2			
Fase de unión:	Matriz detrítica	75			
Otros:	Opacos	8			
Vacíos ² :	Fracturación abierta	3			

¹ Porcentaje obtenido por: comparación de cartas visuales, contador de puntos, otros:
² Espacios vacíos observados al microscopio óptico de polarización, otros:

TEXTURA MICROSCÓPICA:

Tipo de textura:	Lutítica-limosa
Tamaño (grano/cristal):	30 µm (cuarzo, grano)
Forma (grano/cristal):	Sub-anguloso – Sub-redondeado
Fase de unión / Bordes:	Matriz detrítica
Espacios vacíos:	Por fracturación abierta
Orientación	Marcada, según So
Distribución	Buena clasificación
Estructuras:	Laminación
Discontinuidades:	Fracturación abierta abundante
Alteración:	La matriz es el resultado de alteración de feldespatos potásico y de mica
Otras características:	Alto porcentaje en opacos

DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES Y ELEMENTOS:

Componente	Descripción petrográfica
Filosilicatos	Son el componente mayoritario de la roca. Predominan las arcillas, pudiendo discriminarse algún feldespato potásico en fase de sericitización (Figura 1), de pequeño tamaño (aproximadamente 40 μm). También se distinguen algunas cintas de moscovita, de eje mayor inferior a 50 μm , en claro estado de alteración. Su orientación preferente define la laminación de la roca.
Cuarzo	Minoritario, se dispone en forma de granos sub-angulosos de hasta 30 μm de diámetro máximo, con reparto heterogéneo, siguiendo la laminación, en bandas con mayor o menor contenido. En la figura 2 se muestra un grano de cuarzo.
Opacos	Son abundantes y aparecen sellando fracturas y siguiendo la laminación (figura 3). Se observan tamaños variables, probablemente en su mayor parte sean materia orgánica. Se asocian preferentemente a la matriz. En la figura 4 se muestra una imagen representativa de la textura de la roca. Las bandas más claras son más ricas en cuarzo.

RESUMEN DE RESULTADOS:

Clasificación petrográfica:	Lutita	
Composición	- mineral:	Cuarzo, moscovita, opacos, sercit-argilita
	- petrográfica:	Cuarzo y moscovita
Textura	- tipo de textura:	Lutítico – limosa
	- tamaño de grano:	Cuarzo y moscovita, aproximadamente 30 μm
Otras características distintivas:	No hay fragmentos de rocas y el feldespato potásico es casi inexistente	

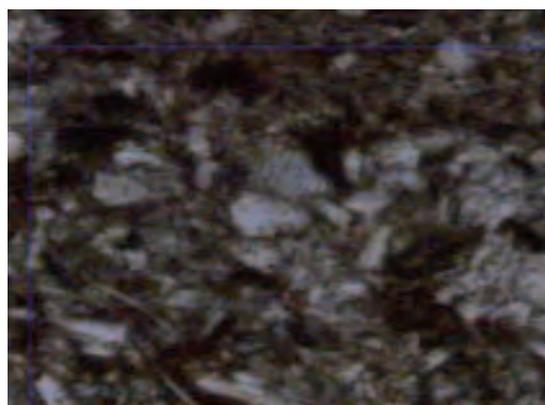
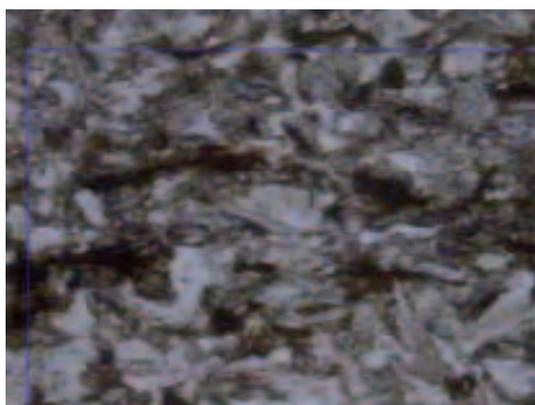
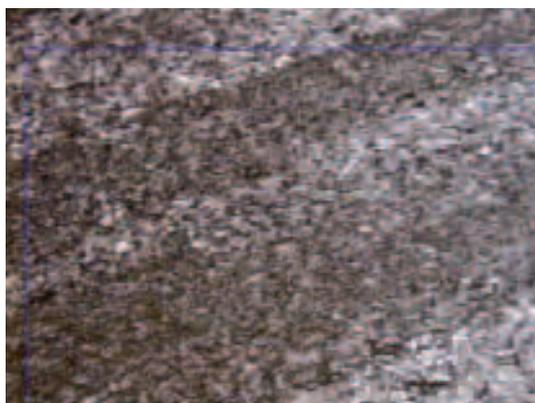
FIGURAS (esquemas, dibujos, fotografías, etc.)

Figura 1. 50x, LPNA

Figura 2. 50x, LPNA

Figura 3. 20x, LPNA

Figura 3. 5x, LPNA

Descripción petrográfica

DATOS DE REFERENCIA:

Nombre comercial:	Nº referencia: MUESTRA 2
Tipo de muestra (número, tamaño, forma...): LD	
Acabado superficial (fractura, sierra...): 30 µm, con cubre	
Color (muestra sana, alterada...):	
Nombre petrográfico (clase de roca):	
Situación geográfica (local, general...):	
Situación geológica (formación, edad...):	

COMPOSICIÓN:

Componentes petrográficos ¹		%	Composición mineral ¹		%
Granos o cristales:	Cuarzo	65			
	Fragmentos de roca	33			
Fase de unión:					
Otros:	Moscovita	< 0.5			
	Opacos	2			
Vacíos ² :	No apreciables, ni intergranulares ni por fracturación				

¹ Porcentaje obtenido por: comparación de cartas visuales, contador de puntos, otros:
² Espacios vacíos observados al microscopio óptico de polarización, otros:

TEXTURA MICROSCÓPICA:

Tipo de textura:	Arenosa
Tamaño (grano/cristal):	Aproximadamente 400µm (tanto para el cuarzo como para los fragmentos de roca)
Forma (grano/cristal):	Subanguloso, muy deformados en el caso de los fragmentos de roca.
Fase de unión / Bordes:	Mo hay fase de unión. Se observan bordes rectos, aunque irregulares.
Espacios vacíos:	No presenta (visibles)
Orientación	No presenta
Distribución	Clasificación media
Estructuras:	No presenta
Discontinuidades:	No presenta a ninguna escala
Alteración:	Evidente de algunos fragmentos de roca (sericitización / caolinitización)
Otras características:	Ausencia de porosidad intergranular

DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES Y ELEMENTOS:

Componente	Descripción petrográfica
Cuarzo	Es el componente fundamental y esencial de la roca. Es generalmente policristalino, aunque en la práctica totalidad de los granos la extinción es recta. El tamaño de diámetro medio está entre 300 y 500 µm, pudiendo superar frecuentemente el mm. El hábito predominante es subanguloso. Es prácticamente carente de inclusiones fluidas, pero con abundantes inclusiones minerales (figura 1), probablemente de materia orgánica, en algún caso apatito. Son cristales sanos.
Fragmentos de roca	Es el componente esencia minoritario, pero de importancia cuantitativa. Tienen naturaleza metamórfica (por la foliación marcada), con una fuerte deformación durante la diagénesis, amoldándose a huecos entre granos de cuarzo. Aparecen a menudo alterados (sericitización), ver figura 2. Los tamaños de grano son similares a los del cuarzo,
Otros	Se ha observado la presencia local de algún grano de moscovita (figura 3), parcialmente alterado y de opacos no identificables, en proporción moderada. Probablemente se trate, mayoritariamente, de materia orgánica.

RESUMEN DE RESULTADOS:

Clasificación petrográfica:	Litarenita	
Composición	- mineral:	Cuarzo, fragmentos de roca, moscovita y opacos
	- petrográfica:	Cuarzo y fragmentos de roca
Textura	- tipo de textura:	Arenosa
	- tamaño de grano:	400 µm
Otras características distintivas:	Ausencia de vacíos y de feldespato potásico	

FIGURAS (esquemas, dibujos, fotografías, etc.)

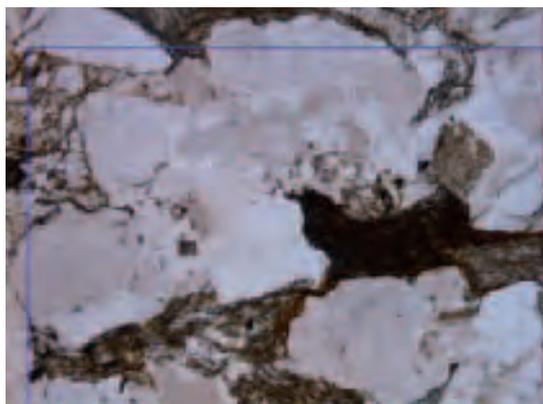


Figura 1. 10x, LPNA

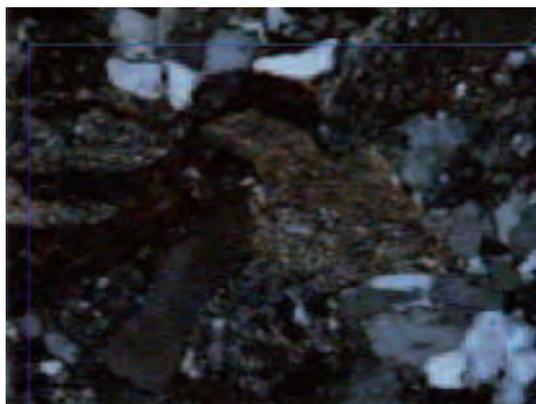


Figura 2. 10x, LPNA



Figura 3. 10x, LPNA

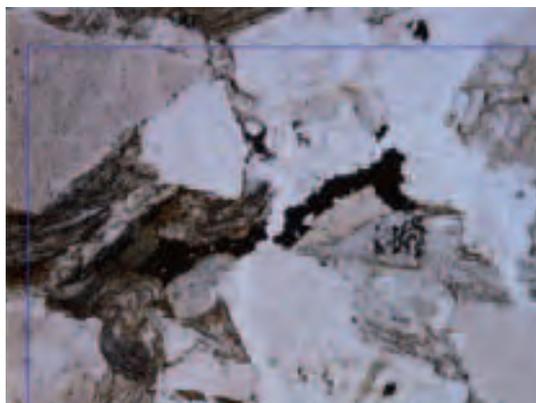


Figura 4. 10x, LPNA

Descripción petrográfica**DATOS DE REFERENCIA:**

Nombre comercial:	Nº referencia: MUESTRA 4
Tipo de muestra (número, tamaño, forma...): LD	
Acabado superficial (fractura, sierra...): 30 µm, con cubre	
Color (muestra sana, alterada...):	
Nombre petrográfico (clase de roca):	
Situación geográfica (local, general...):	
Situación geológica (formación, edad...):	

COMPOSICIÓN:

Componentes petrográficos ¹			Composición mineral ¹	
		%		%
Granos o cristales:	Cuarzo	35		
	Calcita	30		
	Fragmentos de roca + moscovita	15		
Fase de unión:	Matriz detrítica silíceo	15		
	Cemento esparítico	4		
Otros:				
Vacíos ² :	Fracturación abierta	1		

¹ Porcentaje obtenido por: comparación de cartas visuales, contador de puntos, otros:

² Espacios vacíos observados al microscopio óptico de polarización, otros:

TEXTURA MICROSCÓPICA:

Tipo de textura:	Arenosa
Tamaño (grano/cristal):	De 200 a 250 µm
Forma (grano/cristal):	Matriz detrítica arcillosa y cemento esparítico.
Fase de unión / Bordes:	Únicamente observables por fracturación abierta (Fig. 5)
Espacios vacíos:	No presenta
Orientación	Subanguloso a subredondeado
Distribución	Clasificación media-buena
Estructuras:	No presenta
Discontinuidades:	Fracturación abierta masoscópica y transgranular microscópica en el cuarzo
Alteración:	Muy débil de la calcita e intensa de la moscovita
Otras características:	Ausencia de feldespatos potásicos

DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES Y ELEMENTOS:

Componente	Descripción petrográfica
Cuarzo	Se presenta en forma de granos de hábito de subanguloso a subredondeado, con clasificación media y de diámetro medio entorno a 220 µm. Suelen estar fracturados de forma transgranular (Fig. 1), siendo predominantemente monocristalinos. A veces presentan extinción ondulante por deformación tectónica o mecánica. Contenido moderado en inclusiones fluidas y minerales, micrométricas en ambos casos.
Carbonato de calcio (calcita)	Aparece bajo dos formas: A. En forma de grano, formando parte del esqueleto mineral de la roca. Se trata de agregados esparíticos, más o menos subredondeados (Fig. 2) con un tamaño de grano, si bien próximo, menos al del cuarzo, en líneas generales. A veces aparecen maclados. B. Formando parte de la fase de unión, en forma de cemento esparítico que rellena la porosidad residual, acompañado de fragmentos de roca y de filosilicatos.

Fragmentos de roca	Aparecen en forma de grano y son cuantitativamente importantes. Presentan una marcada foliación, por lo que su naturaleza se puede presumir metamórfica (Fig. 3). Apenas tienen cuarzo de composición y no se encuentran orientados. Tampoco son habituales, al contrario que en otras muestras, las deformaciones.
Filosilicatos	No son muy abundantes, son granos dispersos bastante alterados de moscovita (Fig. 4). Junto con la calcita, también configuran una parte importante de la matriz detrítica, en este caso en forma de fases arcillosas.

RESUMEN DE RESULTADOS:

Clasificación petrográfica:	Grauvaca calcarenítica	
Composición	- mineral:	Cuarzo, calcita, fragmentos de roca, moscovita y calcita
	- petrográfica:	Cuarzo, calcita y fragmentos de roca
Textura	- tipo de textura:	Arenosa
	- tamaño de grano:	De 200 a 250 µm (arena fina)
Otras características distintivas:	Nada destacable	

FIGURAS (esquemas, dibujos, fotografías, etc.)

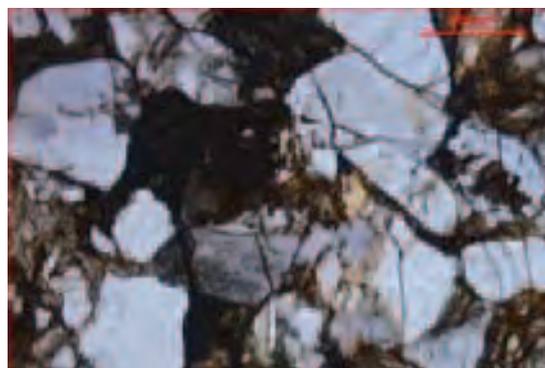


Figura 1. 10x, LPNA

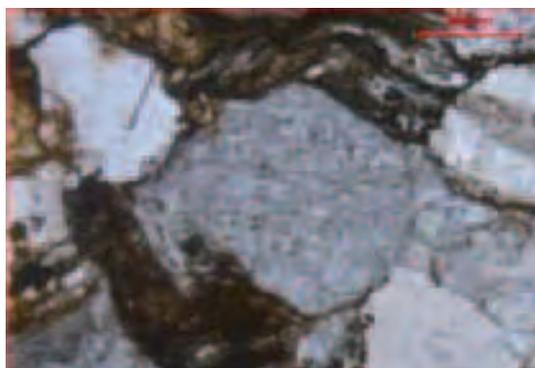


Figura 2. 20x, LPNA

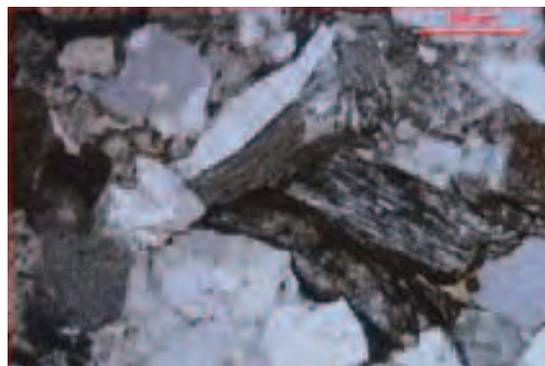


Figura 3. 10x, LPNA



Figura 4. 20x, LPA

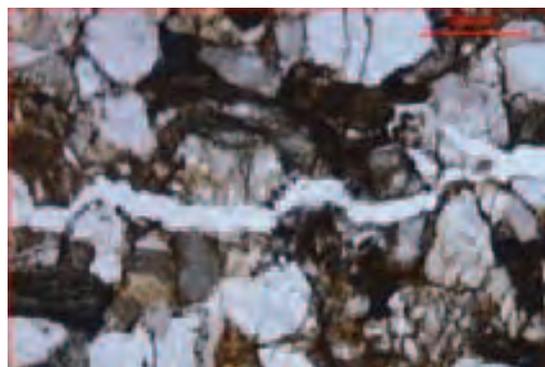


Figura 5. 10x, LPNA

Descripción petrográfica

DATOS DE REFERENCIA:

Nombre comercial:	Nº referencia: MUESTRA 6a
Tipo de muestra (número, tamaño, forma...): LD	
Acabado superficial (fractura, sierra...): 30 µm, con cubre	
Color (muestra sana, alterada...):	
Nombre petrográfico (clase de roca):	
Situación geográfica (local, general...):	
Situación geológica (formación, edad...):	

COMPOSICIÓN:

Componentes petrográficos ¹			Composición mineral ¹	
		%		%
Granos o cristales:	Cuarzo	55		
	Fragmentos de roca	37		
Fase de unión:	No existe			
Otros:	Opacos	2		
Vacíos ² :	Intergranular	2		
	Fracturación abierta	4		

¹ Porcentaje obtenido por: comparación de cartas visuales, contador de puntos, otros:
² Espacios vacíos observados al microscopio óptico de polarización, otros:

TEXTURA MICROSCÓPICA:

Tipo de textura:	Arenosa
Tamaño (grano/cristal):	Aproximadamente 750 µm para el cuarzo y ligeramente menor en los fragmentos de roca
Forma (grano/cristal):	Subredondeado
Fase de unión / Bordes:	No existe fase de unión. Se observan bordes irregulares pero netos
Espacios vacíos:	Muy abundantes, tanto intergranular como por fracturación abierta
Orientación	No presenta
Distribución	Clasificación media-baja
Estructuras:	No presenta
Discontinuidades:	Macro y microfracturación muy abundante
Alteración:	Clara de los fragemntos de roca tipo a
Otras características:	Nada destacable, a excepción de los agregados de chert.

DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES Y ELEMENTOS:

Componente	Descripción petrográfica
Cuarzo	Es el componente mayoritario esencial de la roca. Se presenta en forma de granos de hábito subredondeado con diámetros entre 240 µm y 1 mm, con predominio de la población entre 700 y 800 µm. Generalmente policristalino, con extinción ondulante generalizada (figura 1). Aunque no parece haber sufrido transformaciones minerales, se encuentra bastante fracturado (figura 2). Son comunes las inclusiones minerales sub-micrométricas.
Fragmentos de roca	Son también muy abundantes. Se distinguen a su vez dos tipos: a. Roca metamórfica esquistosa y b. agregados de chert (figuras 3 y 4 respectivamente). En el primer caso aparecen bastante alteradas y muy deformadas, mientras que los agregados de chert se presentan sanos. Se adivinan relictos musáceos.
Opacos	Son escasos, pero de buen tamaño (figura 5). Parecen presentarse a modo de costras sobre superficies minerales. Probablemente son materia orgánica (figura 5).

RESUMEN DE RESULTADOS:

Clasificación petrográfica:		Litarenita
Composición	- mineral:	Cuarzo, chert, fragmentos de roca y opacos
	- petrográfica:	cuarzo y fragmentos de roca
Textura	- tipo de textura:	Arenosa
	- tamaño de grano:	Aproximadamente 750 μm , aunque varía entre 250 μm y 1 mm
Otras características distintivas:		Elevada porosidad total.

FIGURAS (esquemas, dibujos, fotografías, etc.)

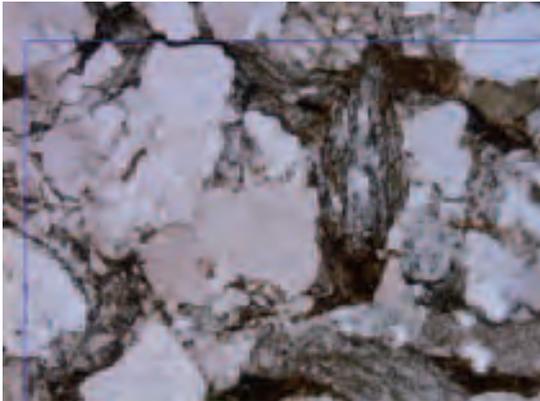


Figura 1. 10x, LPNA

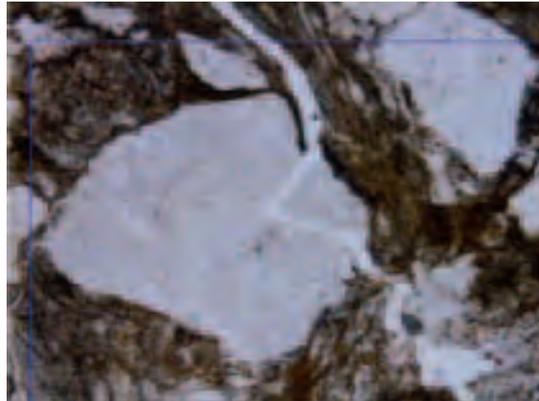


Figura 2. 20x, LPNA

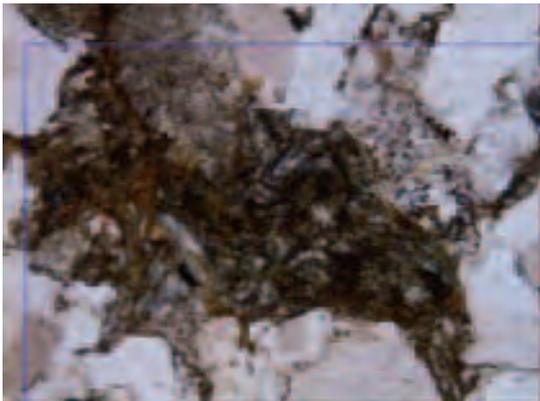


Figura 3. 20x, LPNA

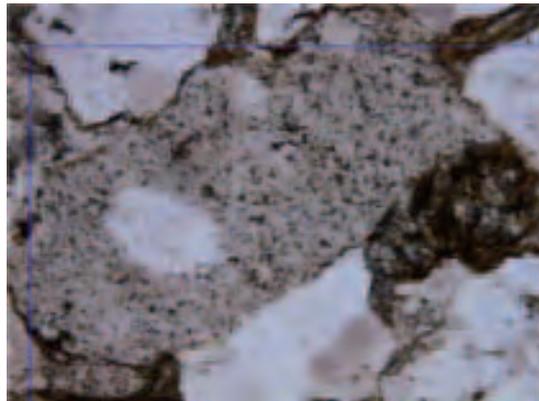


Figura 4. 20x, LPNA

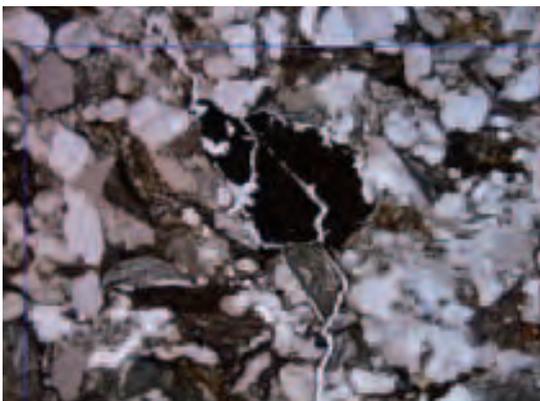


Figura 5. 10x, LPNA

Descripción petrográfica

DATOS DE REFERENCIA:

Nombre comercial:	Nº referencia: MUESTRA 6b
Tipo de muestra (número, tamaño, forma...): LD	
Acabado superficial (fractura, sierra...): 30 µm, con cubre	
Color (muestra sana, alterada...):	
Nombre petrográfico (clase de roca):	
Situación geográfica (local, general...):	
Situación geológica (formación, edad...):	

COMPOSICIÓN:

Componentes petrográficos ¹		%	Composición mineral ¹		%
Granos o cristales:	Cuarzo	96			
	Fragmentos de Roca	37			
	Otros (Calcita, Materia Orgánica, Fragmentos de Roca y Moscovita)	4			
Fase de unión:	No Existe				
Otros:					
Vacíos ² :	Sellados				

¹ Porcentaje obtenido por: comparación de cartas visuales, contador de puntos, otros:
² Espacios vacíos observados al microscopio óptico de polarización, otros:

TEXTURA MICROSCÓPICA:

Tipo de textura:	Arenosa
Tamaño (grano/cristal):	160 µm
Forma (grano/cristal):	Subeuhedral
Fase de unión / Bordes:	No existe
Espacios vacíos:	No observables intergranulares, fracturas selladas
Orientación	No presenta
Distribución	Clasificación media-buena
Estructuras:	No presenta
Discontinuidades:	Fracturación no persistente, meso y microscópica selada
Alteración:	Somera de la moscovita y evidente de la calcita y los fragmentos de roca
Otras características:	Roca prácticamente metamórfica, que configura una parte de otra sedimentaria detrítica

DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES Y ELEMENTOS:

Componente	Descripción petrográfica
Cuarzo	Se trata del canto de una pudinga (denominación a nivel de cuenca de un conglomerado de canto silíceo) que está prácticamente una roca monomineral formada mayoritariamente por cuarzo (Fig. 1). Los granos de cuarzo son subeuhedrales, sanos, con los contactos entre sí netos y bien definidos y sin síntomas de haber sufrido anquimetamorfismo. El tamaño medio de grano se sitúa en 160 µm, variando entre 120 y 200 µm. En su totalidad se trata de cuarzo monocristalino, bastante limpio, con su estructura cristalina interna deformada, más claramente en los granos de mayor tamaño. No existe proisidad intergranular alguna. No hay chert ni fracturación transgranular.

Otros	<p>En pequeñas proporciones, y en forma de grano, se han identificado ejemplos dispersos de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Materia orgánica? (Opacos) (Fig. 2), de menos de 100 μm de diámetro. • Feldespato potásico maclado (Fig. 3) • Moscovita, en cintas sanas, no deformadas (Fig. 4) • Calcita muy escasa y bastante alterada, principalmente como relleno de fracturas abiertas (Fig. 5) • Fragmentos de roca de pequeño tamaño y en avanzado estado de alteración • La fracturación observada es poco persistente y aparece sellada.
-------	--

RESUMEN DE RESULTADOS:

Clasificación petrográfica:		Cuarciarenita-Ortocuarcita
Composición	- mineral:	Cuarzo, Materia orgánica, fragmentos de roca, calcita, moscovita y feldespato potásico
	- petrográfica:	Cuarzo, calcita y fragmentos de roca
Textura	- tipo de textura:	Arenosa
	- tamaño de grano:	160 μm
Otras características distintivas:		Canto de una pudinga.

FIGURAS (esquemas, dibujos, fotografías, etc.)



Figura 1. 5x, LPA

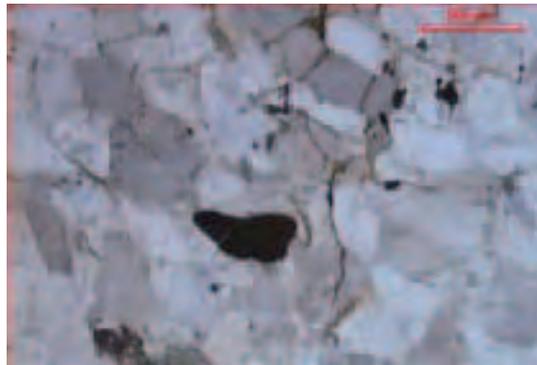


Figura 2. 10x, LPNA



Figura 3. 20x, LPA

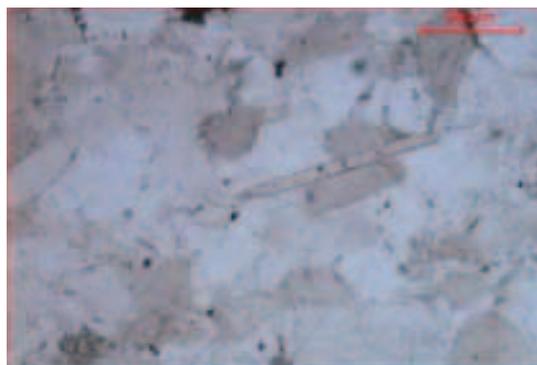


Figura 4. 10x, LPNA



Figura 5. 10x, LPA

Descripción petrográfica

DATOS DE REFERENCIA:

Nombre comercial:	Nº referencia: MUESTRA 7
Tipo de muestra (número, tamaño, forma...): LD	
Acabado superficial (fractura, sierra...): 30 µm, con cubre	
Color (muestra sana, alterada...):	
Nombre petrográfico (clase de roca):	
Situación geográfica (local, general...):	
Situación geológica (formación, edad...):	

COMPOSICIÓN:

Componentes petrográficos ¹		%	Composición mineral ¹		%
Granos o cristales:	Cuarzo	30			
	Fragmentos de roca	15			
	Calcita	33			
	Otros (materia orgánica y moscovita)	3			
Fase de unión:	Matriz detrítica limoso-arcillosa	13			
	Cemento microesparítico	6			
Otros:					
Vacíos ² :	No presenta				

¹ Porcentaje obtenido por: comparación de cartas visuales, contador de puntos, otros:
² Espacios vacíos observados al microscopio óptico de polarización, otros:

TEXTURA MICROSCÓPICA:

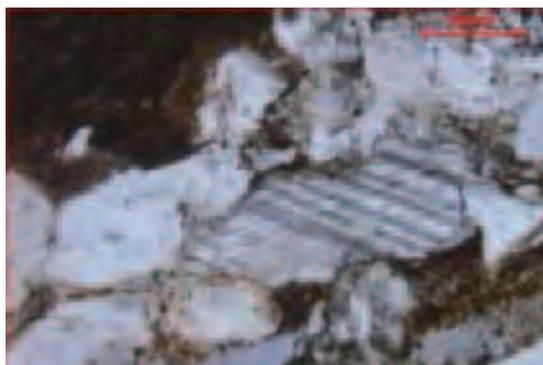
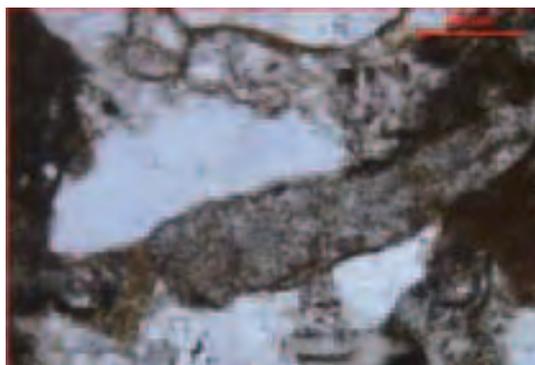
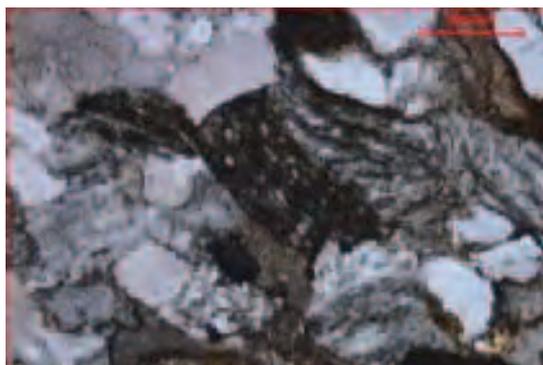
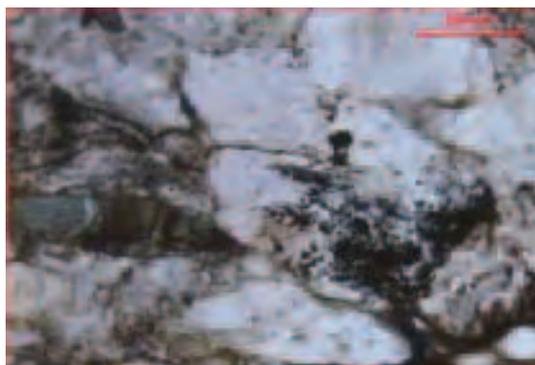
Tipo de textura:	Arenosa limoso-arcillosa
Tamaño (grano/cristal):	240 µm
Forma (grano/cristal):	Cuarzo anguloso, fragmentos de roca angulosos, calcita subangulosa
Fase de unión / Bordes:	Matriz detrítica y cemento microesparítico subredondeado
Espacios vacíos:	No observables
Orientación	No presenta
Distribución	Clasificación buena
Estructuras:	No presenta
Discontinuidades:	No presenta
Alteración:	Somera de la calcita y los fragmentos de roca
Otras características:	Se trata de la misma roca que la muestra 4

DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES Y ELEMENTOS:

Componente	Descripción petrográfica
Cuarzo	Se presenta en forma de granos angulosos en el esqueleto mineral de la roca. Existen individuos policristalinos, aunque son minoritarios. Como suele ser habitual, en la mayoría de las ocasiones presenta extinción ondulante. No suele estar fracturado. Los granos más redondeados a veces son parcialmente reemplazados por calcita. Es muy similar a la muestra 4, a excepción de una mayor proporción de opacos (¿materia orgánica?). el tamaño medio es de 240 μm .
Calcita	Presenta hábito más redondeado que el cuarzo. Cuando está en forma de grano se distinguen, a su vez, dos variedades: <ul style="list-style-type: none"> • Cristales maclados (Fig. 1) de 200 a 250 μm • Agregados esparíticos, ligeramente mayores (Fig. 2) y micro-esparíticos. A veces incorporan pequeñas cantidades de cuarzo. También está presente la calcita en la fase de unión, en una proporción importante.
Fragmentos de roca	Tienen naturaleza metamórfica. Están formados por filosilicatos con gran desarrollo de la foliación. No se encuentra orientados y si algo más deformados que en la muestra 4, amoldándose a espacios entre granos de cuarzo y carbonato. Pueden contener pequeñas partículas de cuarzo (Fig. 3)
Opacos	Probablemente (por el contexto geológico en que fue tomada la muestra) se trate de materia orgánica. Pueden aparecer en forma de granos aislados (50-80 μm) y, en mayor medida, como inclusiones minerales en el cuarzo (Fig. 4)
Otros	Se ha observado alguna cinta aislada y alterada de moscovita

RESUMEN DE RESULTADOS:

Clasificación petrográfica:	Grauvaca calcarenítica	
Composición	- mineral:	Cuarzo, calcita, fragmentos de roca, materia orgánica y morcovita
	- petrográfica:	cuarzo, calcita y fragmentos de roca
Textura	- tipo de textura:	Arenosa limoso-arcillosa
	- tamaño de grano:	240 μm .
Otras características distintivas:	Apreciable contenido en carbón.	

FIGURAS (esquemas, dibujos, fotografías, etc.)

Figura 1. 20x, LPNA

Figura 2. 20x, LPNA

Figura 3. 10x, LPNA

Figura 4. 20x, LPNA

Descripción petrográfica

DATOS DE REFERENCIA:

Nombre comercial:	Nº referencia: MUESTRA 8
Tipo de muestra (número, tamaño, forma...): LD	
Acabado superficial (fractura, sierra...): 30 µm, con cubre	
Color (muestra sana, alterada...):	
Nombre petrográfico (clase de roca):	
Situación geográfica (local, general...):	
Situación geológica (formación, edad...):	

COMPOSICIÓN:

Componentes petrográficos ¹			Composición mineral ¹	
		%		%
Granos o cristales:	Materia orgánica?	2		
Fase de unión:	Mstriz detrítica limoso-arcillosa	97		
Otros:				
Vacíos ² :	Intergranular	1		

¹ Porcentaje obtenido por: comparación de cartas visuales, contador de puntos, otros:
² Espacios vacíos observados al microscopio óptico de polarización, otros:

TEXTURA MICROSCÓPICA:

Tipo de textura:	Lutítica-limosa
Tamaño (grano/cristal):	< 20 µm
Forma (grano/cristal):	Cuarzo subredondeado. Imprecisable para la fracción
Fase de unión / Bordes:	matriz detrítica (la totalidad de la roca) arcillosa
Espacios vacíos:	Intergranulares
Orientación	Marcada, según la estratificación
Distribución	No procede
Estructuras:	Laminación
Discontinuidades:	No presenta
Alteración:	No presenta
Otras características:	Nada destacable

DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES Y ELEMENTOS:

Componente	Descripción petrográfica
	Se trata de una roca de la familia de las lutitas (limolitas), formada íntegramente (a excepción de los opacos) por partículas minerales de tamaño inferior a 20 μm , siendo todas ellas, bien cuarzo, bien filosilicatos (micas y arcillas). Una imagen representativa de la textura de la roca se presenta en la Fig. 1. Las micas se disponen perfectamente orientadas según la dirección de la estratificación. Existe porosidad intergranular (Fig. 3) que define espacios vacíos de hasta 140 μm de diámetro, y nula por fracturación.
Otros	Los opacos son los únicos componentes que se pueden considerar como grano. Son relativamente abundantes, configurando unidades habitualmente elípticas (Fig. 2) de hasta 70 μm de eje mayor.

RESUMEN DE RESULTADOS:

Clasificación petrográfica:	Lutita	
Composición	- mineral:	cuarzo, filosilicatos (sericita, fases arcillosas, micas), opacos
	- petrográfica:	cuarzo y filosilicatos
Textura	- tipo de textura:	Lutítico-limosa
	- tamaño de grano:	< 20 μm
Otras características distintivas:	Podría considerarse, por su aspecto, una lutita negra	

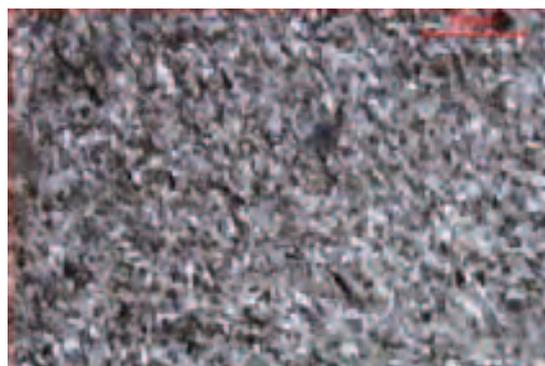
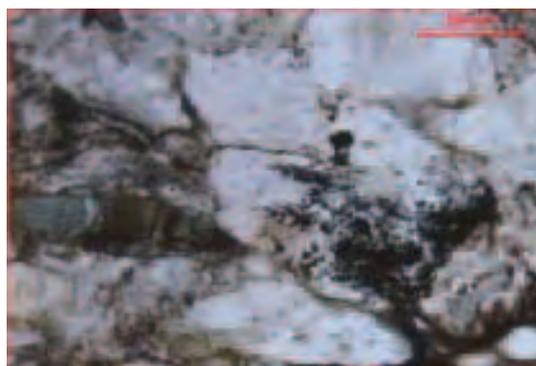
FIGURAS (esquemas, dibujos, fotografías, etc.)

Figura 1. 10x, LPNA

Figura 2. 50x, LPNA

Figura 3. 10x, LPNA

Descripción petrográfica

DATOS DE REFERENCIA:

Nombre comercial:	Nº referencia: MUESTRA 9
Tipo de muestra (número, tamaño, forma...): LD	
Acabado superficial (fractura, sierra...): 30 µm, con cubre	
Color (muestra sana, alterada...):	
Nombre petrográfico (clase de roca):	
Situación geográfica (local, general...):	
Situación geológica (formación, edad...):	

COMPOSICIÓN:

Componentes petrográficos ¹		%	Composición mineral ¹		%
Granos o cristales:	Cuarzo	40			
	Moscovita	12			
	Opacos (carbón?)	15			
Fase de unión:	Matriz detrítica	30			
Otros:					
Vacíos ² :	Intergranulares	< 1			
	Por fracturación abierta	2-3			

¹ Porcentaje obtenido por: comparación de cartas visuales, contador de puntos, otros:
² Espacios vacíos observados al microscopio óptico de polarización, otros:

TEXTURA MICROSCÓPICA:

Tipo de textura:	Arenosa limoso-arcillosa
Tamaño (grano/cristal):	100 µm para el cuarzo y hasta 400 para La moscovita
Forma (grano/cristal):	Angulosa- subangulosa (subeuhedral)
Fase de unión / Bordes:	Matriz detrítica limoso-arcillosa
Espacios vacíos:	Intergranulares (escasos) y por fracturación abierta
Orientación	Laminación según So definida por pasos de carbón
Distribución	Clasificación buena
Estructuras:	Laminación y bioturbación
Discontinuidades:	Meso y microscópicas
Alteración:	Moderada de La moscovita y somera en el cuarzo
Otras características:	Gran porcentaje de moscovita em forma de grano

DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES Y ELEMENTOS:

Componente	Descripción petrográfica
Cuarzo	Forma parte, como grano, del esqueleto mineral de la roca. Una imagen representativa de la textura de la misma se presenta en la Fig. 1. Hábito variable, de anguloso a subanguloso, con tamaño medio de diámetro sobre 100 μm . Moderadamente alterado y fracturado, generalmente monocristalino y con extinción ondulante. Son muy habituales las inclusiones minerales, probablemente materia orgánica (Fig. 2)
Moscovita	Muy abundante en forma de grano, acompañando al cuarzo. Contrasta la gran presencia de moscovita con la práctica ausencia de fragmentos de roca. Son láminas muy delgadas (de hasta 400 μm de eje mayor) moderadamente alteradas, que presentan una orientación no muy marcada, pero si identificable según So, marcada además por pasados sub-milimétricas de carbón (Fig. 3). Están, las mayores, suavemente deformadas.
Opacos	Presumiblemente se trata de pasadas de carbón, que se disponen según la dirección de la estratificación en láminas de espesor generalmente inferior a 1 cm (Fig. 4). Suelen contener granos de cuarzo y, en mayor medida, de mica. Ocasionalmente puede aparecer en forma de grano.
Matriz detrítica	La matriz detrítica de la roca está formada por sericita y otros filosilicatos no identificables, en los tamaños limo y arcilla.

RESUMEN DE RESULTADOS:

Clasificación petrográfica:	Cuarzovaca o grauavaca filarenítica	
Composición	- mineral:	Cuarzo, moscovita, carbón y arcillas
	- petrográfica:	Cuarzo y matriz arcillosa
Textura	- tipo de textura:	Arenosa limoso-arcillosa
	- tamaño de grano:	100 μm
Otras características distintivas:	Ausencia total de fragmentos de roca y presencia de carbón	

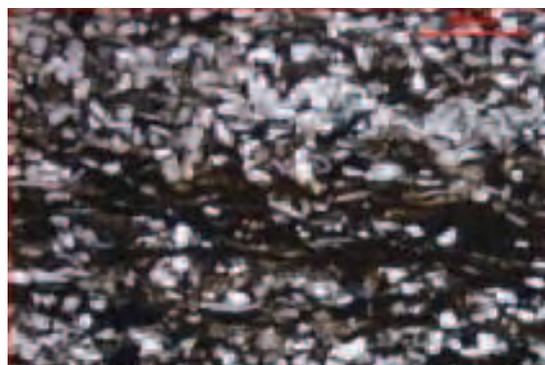
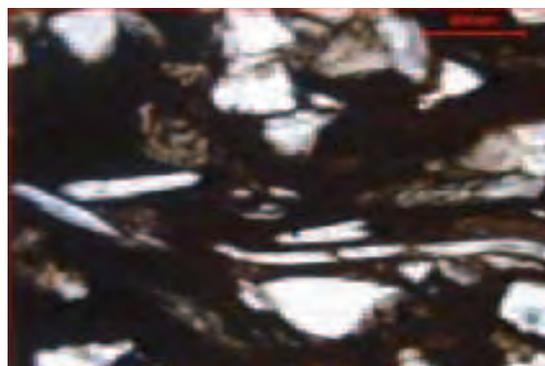
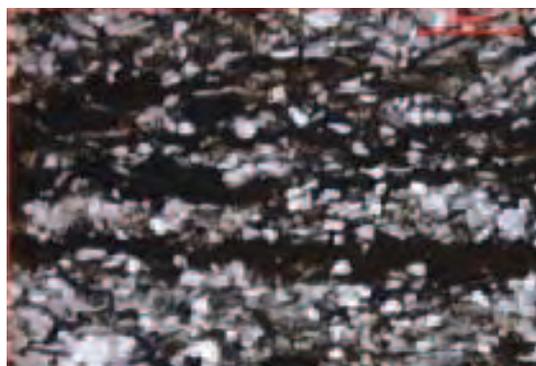
FIGURAS (esquemas, dibujos, fotografías, etc.)

Figura 1. 5x, LPNA

Figura 2. 20x, LPNA

Figura 3. 20x, LPNA

Figura 4. 5x, LPNA

Descripción petrográfica

DATOS DE REFERENCIA:

Nombre comercial:	Nº referencia: MUESTRA 10
Tipo de muestra (número, tamaño, forma...): LD	
Acabado superficial (fractura, sierra...): 30 µm, con cubre	
Color (muestra sana, alterada...):	
Nombre petrográfico (clase de roca):	
Situación geográfica (local, general...):	
Situación geológica (formación, edad...):	

COMPOSICIÓN:

Componentes petrográficos ¹			Composición mineral ¹	
		%		%
Granos o cristales:	Cuarzo	40		
	Carbonato	25		
	Fragmentos de roca	30		
	Opacos (carbón?)	2		
Fase de unión:	Matriz arcillosa	2		
Otros:				
Vacíos ² :	Fracturación abierta	1		

¹ Porcentaje obtenido por: comparación de cartas visuales, contador de puntos, otros:
² Espacios vacíos observados al microscopio óptico de polarización, otros:

TEXTURA MICROSCÓPICA:

Tipo de textura:	Arenosa
Tamaño (grano/cristal):	220 µm
Forma (grano/cristal):	euhedral- subeuhedral
Fase de unión / Bordes:	Matriz detrítica (alteración de fragmentos de roca) casi inexistente
Espacios vacíos:	Únicamente por fracturación abierta
Orientación	No presenta
Distribución	Clasificación media
Estructuras:	No presenta
Discontinuidades:	Fracturación microscópica abierta, presumiblemente según So
Alteración:	Sericitización leve de los fragmentos de roca
Otras características:	Prácticamente ausencia de matriz

DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES Y ELEMENTOS:

Componente	Descripción petrográfica
Cuarzo	Se presenta en forma de grano, predominando los individuos monocristalinos. Prácticamente la totalidad de los granos presentan extinción recta, hábito variable anguloso-subanguloso y un tamaño medio de diámetro de 220 μm (entre 150 y 250 μm). los bordes de grano pueden estar ligeramente alterados, pero no existen indicios de reemplazamiento ni de metamorfismo (Fig. 1)
Calcita	Se observan abundantes granos de carbonato en la muestra, que, por otra parte, da positivo al ensayo de efervescencia de HCl, luego quedaría determinado que se trata de calcita. Los tamaños de grano son algo más variables que para el cuarzo, y, en general, menores. A menudo aparecen cristales maclados, aunque fundamentalmente se trata de agregados pseudo-elípticos de esparita y/o microesparita (Fig. 2). Frecuentemente contienen inclusiones minerales y/o opacos de buen tamaño (ver Fig. 2, grano de carbonato superior)
Fragmentos de roca	Se trata del tercer componente que existe como grano. Su naturaleza es metamórfica, presentando en la totalidad de los casos, una marcada foliación de filiación pizarrosa o micro-neísica. Con LPA es posible observar que se encuentra formados por filosilicatos en ligero proceso de alteración a arcillas (Fig. 3). Suelen amoldarse a los espacios entre los granos de cuarzo y carbonato, con la consiguiente deformación.
Opacos	Son escasos y coexisten en forma de grano con los tres componentes anteriores. Su tamaño no suele sobrepasar las 150 μm (Fig. 4)

RESUMEN DE RESULTADOS:

Clasificación petrográfica:	Litarenita (Calcarenita/Filarenita)	
Composición	- mineral:	cuarzo, calcita, fragmentos de roca, opacos
	- petrográfica:	cuarzo, calcita y fragmentos de roca
Textura	- tipo de textura:	arenosa
	- tamaño de grano:	220 μm
Otras características distintivas:	Roca sin apenas fase de unión, en la que tampoco hay porosidad intergranular.	

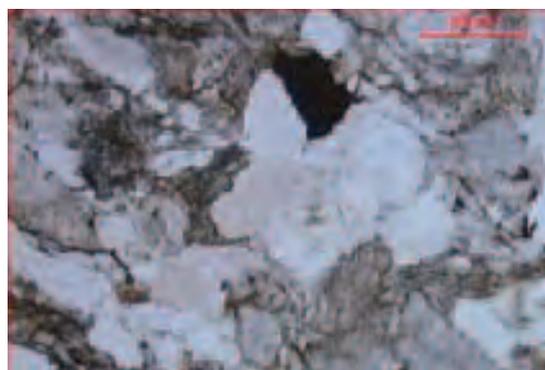
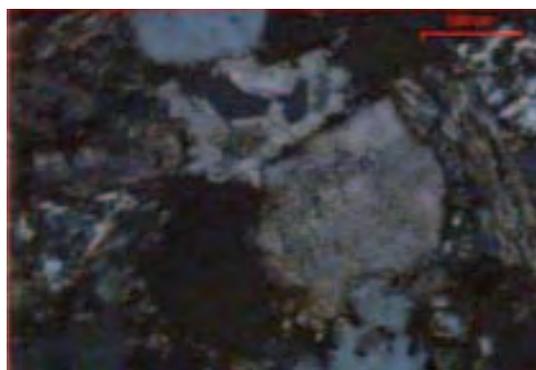
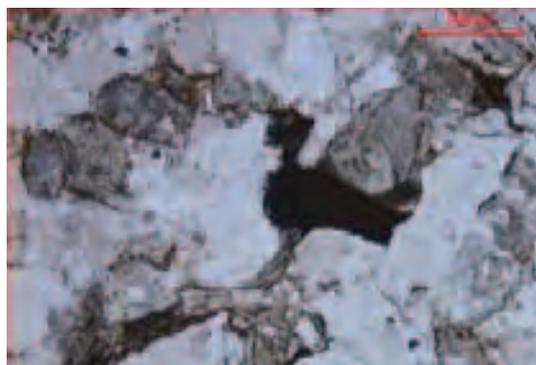
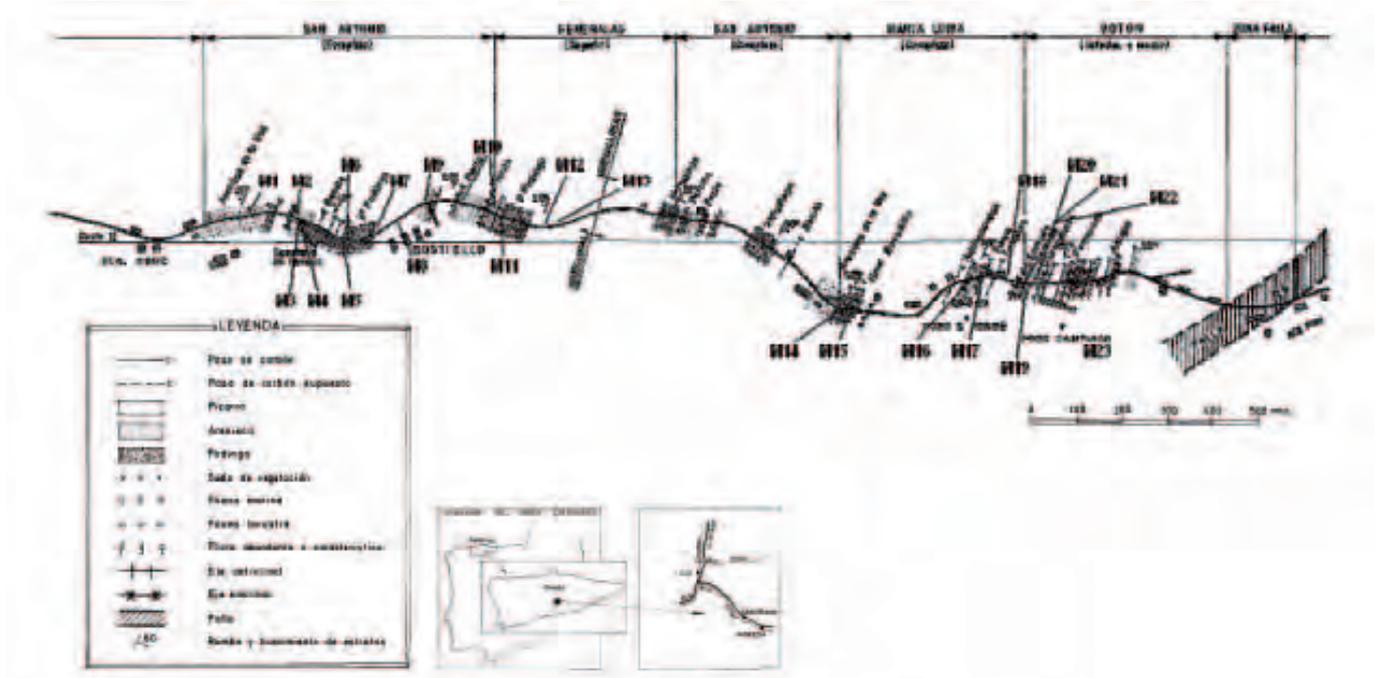
FIGURAS (esquemas, dibujos, fotografías, etc.)

Figura 1. 10x, LPNA

Figura 2. 10x, LPNA

Figura 3. 20x, LPNA

Figura 4. 10x, LPNA

- **Paquete M^a Luisa:** La potencia total de este paquete varía entre 270 y 310 m, pudiéndose adoptar como espesor más representativo 300 m. Las labores del Pozo Barredo únicamente abarcan el primer tramo. Este tramo es continental, de 16 a 40 m. de espesor, 35 en nuestro caso, y descansa sobre las Areniscas de la Voz encerrando de tres a seis pasos de carbón, de los que dos o tres son explotables. De las muestras tomadas, a este tramo corresponden las muestras 14,

15, 16 y 17. Estas muestras no fueron estudiadas al microscopio debido a que, en el caso que nos ocupa, la caña del pozo y las labores próximas a esta, no afectan al Paquete M^a Luisa.
 - El resto de las muestras tomadas, correspondientes al Paquete Sotón, (muestras 18 a 23) no se consideran en este trabajo, debido a que quedarían fuera del área de estudio, y por tanto estas no fueron tampoco estudiadas al microscopio.



Muestra	Características
M1	Arenisca de La Voz. Tomada en el flanco oeste del sinclinal de Revallines (Buzamiento=64°W)
M2	Arenisca próxima al Sanatorio
M3	Niveles lutíticos interestratificados en el banco de Arenisca, entre Sta Cruz y el Sanatorio
M4	Arenisca micacea tomada 50 m antes del Sanitario
M5	Techo de la Pudinga de San Antonio
M6	Pudinga de San Antonio
M7	Arenisca con carbón
M8	Limonita a muro de la arenisca a muro de la Pudinga de San Antonio (frente a Bustiello)
M9	Bancos de arenisca en el paquete lutítico de Bustiello
M10	Arenisca clara (tomada junto a la casa "Vistalegre")
M11	Pudinga de Generales
M12	Lutita/limonita de muro de la pudinga de Generales
M13	Arenisca intercalas entre las lutitas en núcleo del anticlinal
M14	Techo de la arenisca de La Voz
M15	Grauvaca por encima de la arenisca de La Voz (tomada en un sendero por encima de la carretera)
M16	Arenisca con abundancia de filosilicatos (tomada a la altura del Pozo San Jorge)
M17	Arenisca de color oscuro
M18	Arenisca tomada entre los pozos de San Jorge y Santiago
M19	Arenisca tomada al inicio dle paquete Sotón
M20	Arenisca tomada al inicio dle paquete Sotón
M21	Arenisca basal con carbón de Sotón
M22	Arenisca basal con carbón de Sotón
M23	Arenisca basal con carbón de Sotón

Figura 95. Ubicación y descripción de las muestras tomadas y estudiadas

PAQUETE		CAPA	DESCRIPCIÓN	POT. (m)
M ^o LUISA	Tramo Continental	lutita/pizarra	Tramo continental. Encierra la capa tercera.	10
		lutita/pizarra		7
		Arenisca		9
		Nivel Lacustre	Fauna lacustre y suelo de vegetación	6
		lutita/pizarra	Fauna de transición o indeterminada. Capa tercera.	3
SAN ANTONIO	Tramo Continental	lutita/pizarra	Suelo de vegetación con fauna de transición o indeterminada	3
		Arenisca		2
		Arenisca	Arenisca con intercalación de una capa de carbón y suelo de vegetación	9
		Arenisca	Arenisca con intercalación de una capa de carbón	4
	Tramo Marino	Arenisca	Arenisca con intercalación de una capa de carbón y suelo de vegetación	19
		lutita/pizarra		11
		Arenisca	Arenisca con intercalación de una capa de carbón y suelo de vegetación	12
		lutita/pizarra	Nivel con fauna marina e intercalación de capa de carbón	4
		Arenisca		2
		lutita/pizarra	Intercalación de capa de carbón	9
		Arenisca		3
		lutita/pizarra	Nivel con fauna marina e intercalación de capa de carbón (Requintina) y suelo de vegetación	12
	Tramo Continental	lutita/pizarra		5
		Arenisca		3
		lutita/pizarra	Alternancia de una capa de carbón	4
		Arenisca		2
		Pudinga	silíceas	6
	Tramo Marino	Arenisca		10
		lutita/pizarra		4
		Arenisca		8
		??		13
		lutita/pizarra	Nivel con fauna marina	13
		Arenisca		2
		lutita/pizarra		2
		Arenisca		1
		lutita/pizarra	Nivel con fauna marina	7
		??		14
		Arenisca		2
		lutita/pizarra	Nivel con fauna marina e intercalación de una capa de carbón	8
		Arenisca		5
		lutita/pizarra	Nivel con fauna marina e intercalación de una capa de carbón	9
		??		3
	Arenisca	Capa Isabela a techo	2	
	Nivel con fauna marina e intercalación de una capa de carbón	8		
Tramo Marino		intercalación de capa de carbón	7	
			228	

PAQUETE		CAPA	DESCRIPCIÓN	POT. (m)
GENERALAS		Pudinga	Con intercalación de un nivel de carbón	24
	Tramo Marino	Arenisca		4
		lutita/pizarra		30
		Arenisca		5
		lutita/pizarra		3
		Arenisca		1
		lutita/pizarra		10
		Arenisca		1
		lutita/pizarra		1
		Arenisca		2
		lutita/pizarra		5
		Arenisca		13
		lutita/pizarra		11
		lutita/pizarra	Nivel con fauna marina y una capa de carbón	31
	Tramo Continental	Arenisca	con suelo de vegetación	3
		lutita/pizarra		2
		Arenisca	con suelo de vegetación	3
		Arenisca	Con intercalación de capa de carbón (Capa Buena Fe)	22
		lutita/pizarra	Con intercalación de capa de carbón	5
		Arenisca		26
	Tramo Marino	???		14
		Arenisca		2
		lutita/pizarra		3
		Arenisca		1
		lutita/pizarra	Con fauna marina	5
		Arenisca	Con intercalación de otras capas y una capa de carbón	4
		Arenisca		5
		lutita/pizarra	Con fauna marina	19
		Arenisca		1
		lutita/pizarra		5
		Arenisca		8
		lutita/pizarra		26
		Caliza	Caliza de la Torala	6
lutita/pizarra	Con fauna marina y una capa de carbón	3		
			304	
CALERAS	Tramo Marino	Arenisca		1
		Lutita/pizarra		6
		Arenisca		2
		Lutita/pizarra		20
		Caliza		1
		Lutita/pizarra	Con fauna marina	13
		Arenisca	Capa Juan Carro a Techo	25
		Lutita/pizarra	Con fauna marina	8
		Arenisca		2
		Lutita/pizarra	Con fauna marina	5
		Arenisca	Con capa de carbón a techo	4
		Lutita/pizarra	Con fauna marina	9
		Arenisca		8
			104	

Tabla 38. Descripción detallada de la columna estratigráfica de Barredo

5.6.2 Determinación de la porosidad

Para la determinación de la porosidad se usó una Balanza Hidrostática Gibertini Cent 3000, con la cual, siguiendo la norma UNE 103-301-94 se calcularon la densidad de las partículas (ρ_m) y la densidad del terreno en las condiciones in-situ (ρ_b). Para ello se tomaron dos muestras de cada una de las rocas tomadas en campo y se siguieron los siguientes procesos:

Densidad del terreno

Para determinar la densidad del terreno se partió de dos muestras de roca fresca cuyas condiciones de humedad correspondían a las que tendrían las rocas in-situ. En la Tabla 39 se adjuntan los resultados obtenidos durante el ensayo. El proceso seguido fue:

1. Se determinó la masa de la muestra con precisión de 0,1 g (M1)
2. Se determinó la masa de la muestra sumergida en agua utilizando la balanza hidrostática (M4).
3. Se calculó el volumen de la muestra, que se correspondería con el volumen de agua desplazado, según la expresión: $V2 = \frac{M1 - M4}{\rho_w}$, donde ρ_w es la densidad

del agua, que en condiciones normales tiene un valor de 1 g/cm³.

4. Para finalizar se determina la densidad del terreno según la expresión:

$$\rho_b = \frac{M1}{V2}$$

Densidad de las partículas

Partiendo de las dos muestras de cada roca anteriores se determinó en primer lugar la humedad (w) de las mismas según la norma UNE 103-300-93, para lo cual se introdujeron en una estufa de desecación a 105 °C hasta masa constante, siendo la humedad la diferencia entre la masa de la muestra en condiciones originales y la masa de la muestra seca. Una vez secadas las muestras se siguieron los siguientes pasos:

1. Se determinó la masa de las muestras secas en una balanza con precisión de 0,1 g (M1)
2. Se recubrió las muestras completamente con parafina de densidad ρ_p de 0.7 g/cm³ y se determinó su masa (M2).
3. Se determinó por diferencia la masa de parafina utilizada: $M3 = M2 - M1$
4. Se pesó la masa de la roca recubierta de parafina e inmersa en agua utilizando la balanza hidrostática (M4).
5. Se calculó el volumen de parafina utilizado con la expresión:

$$V1 = \frac{M2 - M1}{\rho_p}$$

6. Se calculó el volumen de la muestra según la expresión: $V2 = \frac{M2 - M4}{\rho_w} - V1$, siendo ρ_w la densidad del

$$V2 = \frac{M2 - M4}{\rho_w} - V1$$

agua.

7. Finalmente se calcula la densidad de la matriz de las muestras:

$$\rho = \frac{M1}{V2}$$

MUESTRA	M1	M4	V2	ρ_b	ρ_b media	
1	A	25,91	15,84	10,07	2,57	2,46
	B	17,69	10,17	7,52	2,35	
2	A	29,08	16,64	12,44	2,34	2,38
	B	34,58	20,27	14,31	2,42	
4	A	33,51	18,37	15,14	2,21	2,21
5	A	37,88	22,76	15,12	2,51	2,41
	B	39,44	22,27	17,17	2,30	
6	Canto A	20,66	12	8,66	2,39	2,13
	Canto B	11,34	5,28	6,06	1,87	
	Matriz C	27,75	15,56	12,19	2,28	2,27
	Matriz D	24,97	13,92	11,05	2,26	
7	A	22,15	12,85	9,3	2,38	2,35
	B	18,83	10,73	8,1	2,32	
8	A	41,28	25,13	16,15	2,56	2,49
	B	16,62	9,74	6,88	2,42	
9	A	25,79	14,47	11,32	2,28	2,25
	B	20,21	11,12	9,09	2,22	
10	A	13,49	7,15	6,34	2,13	2,07
	B	10,48	5,26	5,22	2,01	
11	Canto A	11,1	6,09	5,01	2,22	2,095
	Canto B	5,9	2,9	3	1,97	
	Matriz C	4,88	2,19	2,69	1,81	
12	A	21,05	12,02	9,03	2,33	2,24
	B	16,96	9,08	7,88	2,15	
13	A	23,72	14,24	9,48	2,5	2,43
	B	11,91	6,87	5,04	2,36	

Tabla 39. Cálculo de la densidad de las muestras

En la tabla 40 se añaden los datos obtenidos durante los ensayos.

Una vez calculadas la densidad del terreno y de las partículas sólidas de la roca, se calcula según la expresión anterior, la porosidad de cada una de las rocas analizadas (Φ), considerando que en las condiciones originales todos los poros estaban saturados de agua, y por tanto la densidad del fluido (ρ_f) es 1 g/cm³. En la tabla 41 se muestran las porosidades de las rocas analizadas expresadas en porcentaje.

Muestra	M1	M2	M3	M4	w	V1	V2	ρ_m	ρ_m media	
1	A	25,68	28,54	2,86	15,25	0,90	4,09	9,20	2,79	2,75
	B	17,51	21,16	3,65	9,47	1,03	5,21	6,48	2,70	
2	A	28,77	31,05	2,28	16,93	1,08	3,26	10,86	2,65	2,54
	B	34,35	36,60	2,25	19,21	0,67	3,21	14,18	2,42	
4	A	33,27	39,97	6,70	18,51	0,72	9,57	11,89	2,80	2,80
5	A	37,60	40,51	2,91	20,70	0,74	4,16	15,65	2,40	2,42
	B	39,15	43,44	4,29	21,19	0,74	6,13	16,12	2,43	
6	Canto A	20,63	22,48	1,85	11,98	0,15	2,64	7,86	2,63	2,55
	Canto B	11,32	12,33	1,01	6,33	0,18	1,44	4,56	2,48	
	Matriz C	27,39	31,59	4,20	14,98	1,31	6,00	10,61	2,58	2,48
	Matriz D	24,61	27,36	2,75	13,08	1,46	3,93	10,37	2,37	
7	A	21,98	23,70	1,72	12,47	0,77	2,46	8,77	2,51	2,53
	B	18,70	21,38	2,68	10,24	0,70	3,83	7,31	2,56	
8	A	40,61	42,99	2,38	24,51	1,65	3,40	15,08	2,69	2,66
	B	16,53	18,01	1,48	9,61	0,54	2,11	6,29	2,63	
9	A	25,29	28,15	2,86	13,27	1,98	4,09	10,79	2,34	2,35
	B	19,55	21,81	2,26	10,30	3,38	3,23	8,28	2,36	
10	A	13,24	14,41	1,17	7,05	1,89	1,67	5,69	2,33	2,30
	B	10,29	11,67	1,38	5,17	1,85	1,97	4,53	2,27	
11	Canto A	11,06	12,20	1,14	6,06	0,36	1,63	4,51	2,45	2,33
	Canto B	5,89	6,55	0,66	2,95	0,17	0,94	2,66	2,22	
	Matriz C	4,82	5,52	0,70	2,34	1,24	1,00	2,18	2,21	2,21
12	A	20,69	22,62	1,93	11,51	1,74	2,76	8,35	2,48	2,40
	B	16,60	17,97	1,37	8,85	2,17	1,96	7,16	2,32	
13	A	23,72	27,77	4,05	12,95	0,00	5,79	9,03	2,63	2,69
	B	11,84	13,80	1,96	6,35	0,59	2,80	4,65	2,55	

Tabla 40. Cálculo de la densidad media de la matriz

MUESTRA	ρ_m	ρ_b	ρ_f	Φ	Φ media	
1	A	2,79	2,57	1,00	12,12	16,38
	B	2,70	2,35	1,00	20,63	
2	A	2,65	2,34	1,00	18,86	9,66
	B	2,42	2,42	1,00	0,47	
5	A	2,40	2,51	1,00	7,36	8,28
	B	2,43	2,30	1,00	9,20	
6	Canto A	2,63	2,39	1,00	14,76	28,02
	Canto B	2,48	1,87	1,00	41,29	
	Matriz C	2,58	2,28	1,00	19,29	13,77
	Matriz D	2,37	2,26	1,00	8,24	
7	A	2,51	2,38	1,00	8,22	11,59
	B	2,56	2,32	1,00	14,96	
8	A	2,69	2,56	1,00	8,09	10,61
	B	2,63	2,42	1,00	13,14	
9	A	2,34	2,28	1,00	4,81	7,45
	B	2,36	2,22	1,00	10,10	
10	A	2,33	2,13	1,00	15,04	17,92
	B	2,27	2,01	1,00	20,80	
11	Canto A	2,45	2,22	1,00	16,26	18,40
	Canto B	2,22	1,97	1,00	20,55	
	Matriz C	2,21	1,81	1,00	32,77	32,77
12	A	2,48	2,33	1,00	9,88	11,21
	B	2,32	2,15	1,00	12,54	
13	A	2,63	2,50	1,00	7,59	9,72
	B	2,55	2,36	1,00	11,84	

Tabla 41. Determinación de la porosidad de las muestras

5.6.3 Determinación de la conductividad térmica

Como se comentó en el apartado 4.6.1, se observa una clara correlación entre el decrecimiento de la porosidad y el incremento de la conductividad térmica de las rocas sedimentarias. Se considerará, pues, que la conductividad total de cada una de rocas que forman la columna estratigráfica del Pozo Barredo sigue el modelo de media geométrica explicado en el apartado 4.6.2, donde la conductividad térmica de un medio poroso constituido por agregados de varios materiales viene dada por la expresión:

$$k = k_m^{1-\phi} \cdot k_f^\phi$$

Donde k es la conductividad total de la muestra, k_m es la conductividad de la matriz de la roca, k_f es la conductividad del fluido contenido en los poros y Φ es la porosidad (dada como fracción decimal), calculada a partir de las densidades del terreno y de las partículas sólidas que lo forman tal y como se explicó en el apartado anterior.

Para obtener la conductividad térmica de la matriz, k_m , se parte de la composición mineralógica de las muestras determina por estudio en lámina delgada al microscopio, estimándose la proporción de los componentes de la matriz sólida en volumen. Es necesario referir estos porcentajes al total de la muestra, teniendo en cuenta el volumen de poros. La conductividad térmica de la matriz se obtiene según la expresión:

$$k_m = \prod_{i=1}^m k_i^{P_i}$$

Donde k_i ($i=1,\dots,m$) es la conductividad térmica de cada uno de los constituyentes (mineral o litológico) que forman la matriz de la roca y P_i su fracción volumétrica (calculada por observación al microscopio). En esta expresión no se tiene en cuenta la materia orgánica. De acuerdo con el trabajo de Abu-Hamdeh y Reeder (2000), se puede considerar una reducción de la conductividad térmica en función del contenido en materia orgánica (M.O.) de la forma que se muestra en la gráfica de la Figura 96. Aunque este trabajo fue desarrollado para materiales arcillosos, ante la escasa información bibliográfica experimental acerca de la relación entre la M.O. y la conductividad térmica, se ha adoptado como válida dicha relación para los materiales estudiados en este caso.

Por otra parte, dado que el interés de este estudio es conocer la conductividad térmica de los materiales del embalse minero, una vez inundado de agua, se ha considerado que en ese caso, todos sus poros estarían saturados de agua, por lo que la conductividad térmica ponderada tiene en cuenta también el volumen de agua contenida en dichos poros, hipótesis, sin duda, conservadora.

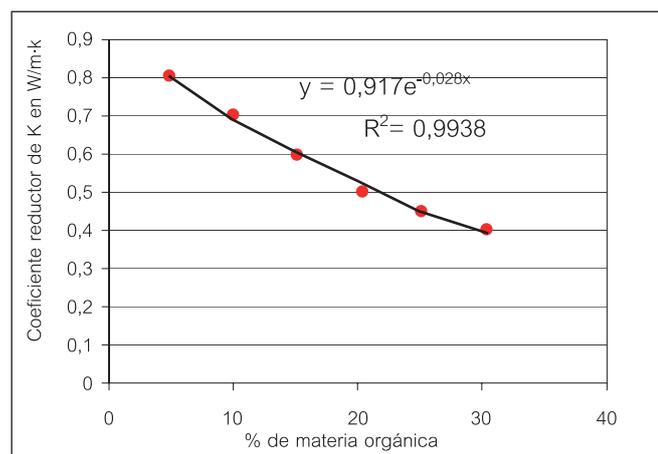


Figura 96. Relación entre contenido en materia orgánica y reducción de la conductividad térmica, según Abu-Hamdeh y Reeder (2000)

En la tabla 42 se muestran las conductividades térmicas de los minerales constituyentes de cada una de

las muestras analizadas (los datos utilizados son los proporcionados en los estudios de Brigaud, 1989, y Horai, 1970).

Mineral	K (W/m·K)
Cuarzo	7,8
Clorita	5,1
Moscovita	2,32
Micas	2,3
Fragmentos de Roca	4,41
Calcita	3,5
Matriz Detrítico-limosa	1,9
Carbón	0,3
Agua	0,6

Tabla 42. Conductividad térmica de los principales componentes de las muestras

Los fragmentos de roca son principalmente gneis, por lo que se considera que su composición mineralógica es 70% clorita ($K=5,1$ W/m·K) y 30% de cuarzo ($K=7,8$ W/m·K), por lo que se toma como conductividad térmica de los mismos la media geométrica ponderada de las conductividades térmicas de cada uno de los minerales, es decir, 4,41 W/m·K. En el caso de la matriz, es principalmente limoso-arcillosa, con predominio de la fase limosa, por lo que para el cálculo de la conductividad térmica se considera que esta fase tiene una conductividad de 1,9 W/m·K.

A continuación en, la Tabla 43, se muestran los resultados obtenidos para cada una de las muestras analizadas, indicándose en cada caso la composición mineralógica, la fracción volumétrica determinada por estudio en lámina delgada al microscopio, la porosidad, la conductividad térmica de cada uno de los minerales y la conductividad térmica obtenida mediante el método de la media geométrica sin tener en cuenta la materia orgánica y corregida en el caso de que la muestra la contuviese.

De acuerdo con las conductividades obtenidas y reflejadas en la Tabla 43, podemos aproximar un perfil térmico en función de la geología que atraviesa el Pozo Barrado y la conductividad térmica de cada una de las capas, como se muestra en la figura 97.

		MUESTRA 1	LUTITA							
Matriz	Composición mineralógica	Fracción volumétrica (con M.O.)	Fracción volumétrica (sin M.O.)	k_i	$k_i^{P_i}$	k_m sin M.O. (W/m·K)	Coef. M.O.	k_m con M.O. (W/m·K)	$k_m^{(1-\phi)}$ (W/m·K)	k
		Cuarzo	12,0%	13,5%	7,80	1,32	2,31	0,73	1,69	
	Moscovita	2,0%	2,2%	2,32	1,02					
	Matriz Detrítica	75,0%	84,3%	1,90	1,72					
	Materia Orgánica	8,0%	-	-	-	-				
Fluido	Fluido	Porosidad						k_f (W/m·K)	k_f^ϕ (W/m·K)	1,42
		Agua	16,4%					0,60	0,92	

		MUESTRA 2	LITARENITA							
Matriz	Composición mineralógica	Fracción volumétrica (con M.O.)	Fracción volumétrica (sin M.O.)	k_i	k_i^{pi}	k_m sin M.O. (W/m·K)	Coef. M.O.	k_m con M.O. (W/m·K)	$k_m^{(1-\phi)}$ M.O. (W/m·K)	k
	Cuarzo	65,0%	66,0%	7,80	3,88	6,40	0,87	5,55	4,70	
	Fragmentos de roca	33,0%	33,5%	4,41	1,64					
	Moscovita	0,5%	0,5%	2,32	1,00					
	Materia Orgánica	2,0%	-	-	-					
Fluido	Fluido	Porosidad							k_f (W/m·K)	k_f^ϕ (W/m·K)
	Agua	9,7%							0,60	0,95

4,47

		MUESTRA 4	GRAUVACA CALCARENITICA							
Matriz	Composición mineralógica	Fracción volumétrica (con M.O.)	Fracción volumétrica (sin M.O.)	k_i	k_i^{pi}	k_m sin M.O. (W/m·K)	Coef. M.O.	k_m con M.O. (W/m·K)	$k_m^{(1-\phi)}$ M.O. (W/m·K)	k
	Cuarzo	35,0%	35,4%	7,80	2,07	4,14	1	4,14	2,61	
	Calcita	30,0%	30,3%	3,40	1,45					
	Moscovita	7,5%	7,6%	2,32	1,07					
	Fragmentos de roca	7,5%	7,6%	4,41	1,12					
	Matriz Detrítica	15,0%	15,2%	1,90	1,10					
	Cemento esparítico	4,0%	4,0%	3,40	1,05					
Materia Orgánica	0,0%	-	-	-						
Fluido	Fluido	Porosidad							k_f (W/m·K)	k_f^ϕ (W/m·K)
	Agua	32,05%							0,60	0,85

2,21

		MUESTRA 5	CUARZOVACA							
Matriz	Composición mineralógica	Fracción volumétrica (con M.O.)	Fracción volumétrica (sin M.O.)	k_i	k_i^{pi}	k_m sin M.O. (W/m·K)	Coef. M.O.	k_m con M.O. (W/m·K)	$k_m^{(1-\phi)}$ M.O. (W/m·K)	k
	Cuarzo	40,0%	43,0%	7,80	2,42	3,51	0,84	2,95	2,70	
	Matriz Arcillosa	50,0%	53,8%	1,90	1,41					
	Moscovita	3,0%	3,2%	2,23	1,03					
Materia Orgánica	3,0%	-	-	-						
Fluido	Fluido	Porosidad							k_f (W/m·K)	k_f^ϕ (W/m·K)
	Agua	8,3%							0,60	0,96

2,59

		MUESTRA 6a	LITARENITA (matriz)							
Matriz	Composición mineralógica	Fracción volumétrica (con M.O.)	Fracción volumétrica (sin M.O.)	k_i	k_i^{pi}	k_m sin M.O. (W/m·K)	Coef. M.O.	k_m con M.O. (W/m·K)	$k_m^{(1-\phi)}$ M.O. (W/m·K)	k
	Cuarzo	55,0%	59,8%	7,80	3,41	6,20	0,89	5,53	4,37	
	Fragmentos de roca	37,0%	40,2%	4,41	1,82					
Materia Orgánica	1,0%	-	-	-						
Fluido	Fluido	Porosidad							k_f (W/m·K)	k_f^ϕ (W/m·K)
	Agua	13,8%							0,60	0,93

4,07

		MUESTRA 6b	CUARCIARENITA-ORTOCUARCITA (canto)							
Matriz	Composición mineralógica	Fracción volumétrica (con M.O.)	Fracción volumétrica (sin M.O.)	k_i	k_i^{pi}	k_m sin M.O. (W/m·K)	Coef. M.O.	k_m con M.O. (W/m·K)	$k_m^{(1-\phi)}$ M.O. (W/m·K)	k
	Cuarzo	55,0%	58,5%	7,80	3,33	6,10	0,89	5,44	3,39	
	Fragmentos de roca	37,0%	39,4%	4,41	1,79					
	Calcita	1,0%	1,1%	3,50	1,01					
	Moscovita	1,0%	1,1%	2,32	1,01					
Materia Orgánica	1,0%	-	-	-						
Fluido	Fluido	Porosidad							k_f (W/m·K)	k_f^ϕ (W/m·K)
	Agua	28,0%							0,60	0,87

2,93

		MUESTRA 7	GRAUVACA CALCARENÍTICA											
Matriz	Composición mineralógica	Fracción volumétrica (con M.O.)	Fracción volumétrica (sin M.O.)	k_i	k_i^{pi}	k_m sin M.O. (W/m·K)	Coef. M.O.	k_m con M.O. (W/m·K)	$k_m^{(1-\phi)}$ M.O. (W/m·K)	k				
	Cuarzo	30,0%	37,7%	7,80	2,17	4,91					0,88	4,32	3,64	3,43
	Fragmentos de roca	15,0%	18,9%	4,41	1,32									
	Calcita	33,0%	41,5%	3,50	1,68									
	Moscovita	1,5%	1,9%	2,32	1,02									
Materia Orgánica	1,5%	-	-	-	-									
Fluido	Fluido	Porosidad						k_f (W/m·K)	k_f^ϕ (W/m·K)					
	Agua	11,6%						0,60	0,94					

		MUESTRA 8	LUTITA											
Matriz	Composición mineralógica	Fracción volumétrica (con M.O.)	Fracción volumétrica (sin M.O.)	k_i	k_i^{pi}	k_m sin M.O. (W/m·K)	Coef. M.O.	k_m con M.O. (W/m·K)	$k_m^{(1-\phi)}$ M.O. (W/m·K)	k				
	Matriz Detrítica	97,0%	100,0%	1,90	1,90	1,90					0,87	1,65	1,56	1,48
	Materia Orgánica	2,0%	-	-	-	-								
Fluido	Fluido	Porosidad						k_f (W/m·K)	k_f^ϕ (W/m·K)					
	Agua	10,6%						0,60	0,95					

		MUESTRA 9	GRAUVACA											
Matriz	Composición mineralógica	Fracción volumétrica (con M.O.)	Fracción volumétrica (sin M.O.)	k_i	k_i^{pi}	k_m sin M.O. (W/m·K)	Coef. M.O.	k_m con M.O. (W/m·K)	$k_m^{(1-\phi)}$ M.O. (W/m·K)	k				
	Cuarzo	40,0%	41,2%	7,80	2,33	2,62					1	2,62	2,44	2,35
	Matriz Detrítica	30,0%	30,9%	1,90	1,22									
	Carbón	15,0%	15,5%	0,30	0,83									
	Moscovita	12,0%	12,4%	2,32	1,11									
Materia Orgánica		-	-	-	-									
Fluido	Fluido	Porosidad						k_f (W/m·K)	k_f^ϕ (W/m·K)					
	Agua													

		MUESTRA 10	LITARENITA											
Matriz	Composición mineralógica	Fracción volumétrica (con M.O.)	Fracción volumétrica (sin M.O.)	k_i	k_i^{pi}	k_m sin M.O. (W/m·K)	Coef. M.O.	k_m con M.O. (W/m·K)	$k_m^{(1-\phi)}$ M.O. (W/m·K)	k				
	Cuarzo	40,0%	40,4%	7,80	2,29	4,88					1	4,88	3,67	3,35
	Matriz Detrítica	2,0%	2,0%	1,90	1,01									
	Carbón	2,0%	2,0%	0,30	0,98									
	Fragmentos de roca	30,0%	30,3%	4,41	1,57									
	Calcita	25,0%	25,3%	3,50	1,37									
Materia Orgánica	0,0%	-	-	-	-									
Fluido	Fluido	Porosidad						k_f (W/m·K)	k_f^ϕ (W/m·K)					
	Agua	17,9%						0,60	0,91					

		MUESTRA 11a	LITARENITA (matriz)											
Matriz	Composición mineralógica	Fracción volumétrica (con M.O.)	Fracción volumétrica (sin M.O.)	k_i	k_i^{pi}	k_m sin M.O. (W/m·K)	Coef. M.O.	k_m con M.O. (W/m·K)	$k_m^{(1-\phi)}$ M.O. (W/m·K)	k				
	Cuarzo	53,0%	53,0%	7,80	2,97	5,79					1	5,79	3,26	2,75
	Matriz Detrítica	2,0%	2,0%	1,90	1,01									
	Fragmentos de roca	43,0%	43,0%	4,41	1,89									
	Micas	2,0%	2,0%	2,30	1,02									
Materia Orgánica	0,0%	-	-	-	-									
Fluido	Fluido	Porosidad						k_f (W/m·K)	k_f^ϕ (W/m·K)					
	Agua	32,8%						0,60	0,85					

		MUESTRA 11b	CUARCIARENITA (canto)											
Matriz	Composición mineralógica	Fracción volumétrica (con M.O.)	Fracción volumétrica (sin M.O.)	k_i	k_i^{pi}	k_m sin M.O. (W/m·K)	Coef. M.O.	k_m con M.O. (W/m·K)	$k_m^{(1-\phi)}$ M.O. (W/m·K)	k				
	Cuarzo	96,0%	96,0%	7,80	7,18	7,42					1	7,42	5,13	4,67
	Moscovita	2,0%	2,0%	2,32	1,02									
	Matriz Detritica	1,0%	1,0%	1,90	1,01									
	Micas	1,0%	1,0%	2,30	1,01									
Materia Orgánica	0,0%	-	-	-	-									
Fluido	Fluido	Porosidad					k_f (W/m·K)	k_f^ϕ (W/m·K)						
	Agua	18,4%					0,60	0,91						

		MUESTRA 12	LUTITA											
Matriz	Composición mineralógica	Fracción volumétrica (con M.O.)	Fracción volumétrica (sin M.O.)	k_i	k_i^{pi}	k_m sin M.O. (W/m·K)	Coef. M.O.	k_m con M.O. (W/m·K)	$k_m^{(1-\phi)}$ M.O. (W/m·K)	k				
	Matriz Detritica	98,0%	100,0%	1,90	1,90	1,90					0,89	1,69	1,60	1,51
	Materia Orgánica	1,0%	-	-	-	-								
Fluido	Porosidad					k_f (W/m·K)	k_f^ϕ (W/m·K)							
Agua	11,2%					0,60	0,94							

		MUESTRA 13	LITARENITA											
Matriz	Composición mineralógica	Fracción volumétrica (con M.O.)	Fracción volumétrica (sin M.O.)	k_i	k_i^{pi}	k_m sin M.O. (W/m·K)	Coef. M.O.	k_m con M.O. (W/m·K)	$k_m^{(1-\phi)}$ M.O. (W/m·K)	k				
	Cuarzo	30,0%	30,9%	7,80	1,89	4,69					1	4,69	4,03	3,84
	Calcita	23,0%	23,7%	3,50	1,35									
	Fragmentos de roca	37,0%	38,1%	4,41	1,76									
	Matriz Limosa	7,0%	7,2%	1,90	1,05									
Materia Orgánica	0,0%	-	-	-	-									
Fluido	Fluido	Porosidad					k_f (W/m·K)	k_f^ϕ (W/m·K)						
	Agua	9,7%					0,60	0,95						

Tabla 43. Cálculo de la conductividad térmica de cada una de las muestras estudiadas

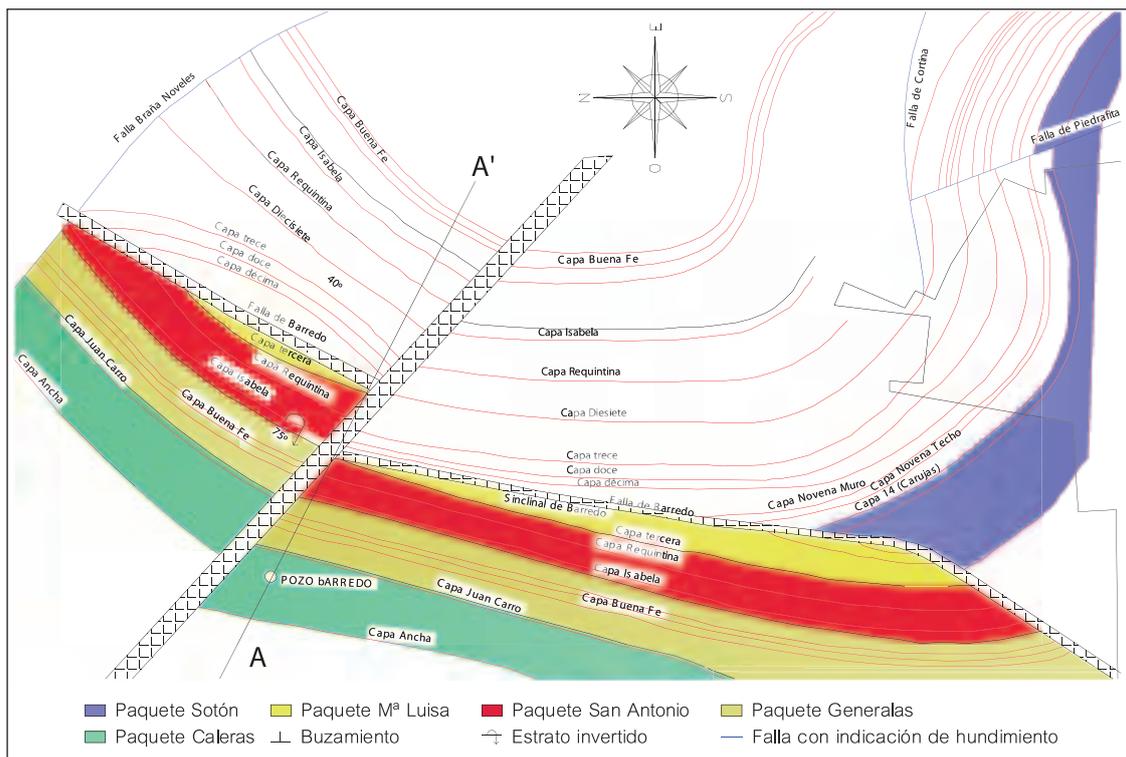


Figura 97. Mapa geológico en el que se indica el corte A-A' por el pozo Barredo (siguiente figura)

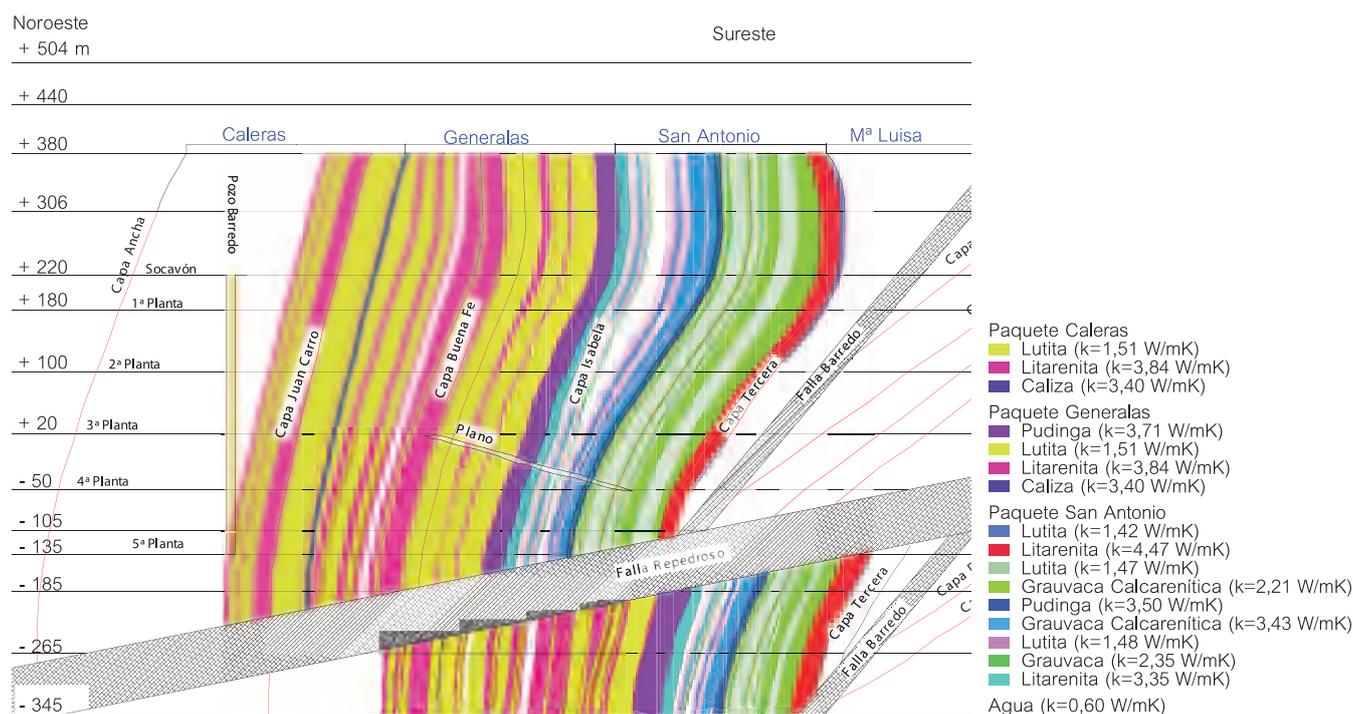


Figura 98. Corte A-A' por el pozo Barredo, indicando las conductividades térmicas calculadas para los distintos materiales geológicos

5.7 Modelo hidrogeológico conceptual

5.7.1 Balance hídrico de la cuenca

En este caso se ha hecho la simplificación de suponer que, dada la escasa permeabilidad de los materiales de la cuenca, durante la fase de bombeo, se extraía 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 de los ríos corresponde durante esta fase de bombeo 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 simplificada del balance anual de la cuenca. Cabe hacer notar que una vez interrumpido el bombeo y recuperado el nivel piezométrico a su régimen natural, el aporte de escorrentía subterránea a los cauces será mayor, pero desconocido en el momento actual.

En la Tabla 44 se muestran los caudales medios bombeados de los pozos de la zona objeto de estudio para el periodo 2002-2007, aportados por el departamento de Medio Ambiente del Grupo HUNOSA.

Pozo	Caudal Medio Anual evacuado (m ³ /año)	Caudal Medio evacuado (l/s)
Pozo Barredo	1.464.167,2	46,4
Pozo Figaredo	2.635.498,9	83,6
Pozo San José	3.631.505,7	115,2
Pozo Sta. Bárbara	765.782,6	24,3
TOTAL	8.496.954,4	269,4

Tabla 44. Caudales evacuados por los pozos ubicados en la zona de estudio en el periodo 2002-2007

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 los pozos ubicados en la zona de estudio (cuenca del río Turón) es de 270 l/s. Como se ha dicho, este valor puede equipararse a la infiltración en la cuenca.

A partir de los datos anteriores, junto con los datos climáticos y los de aforo de caudal, es posible realizar un **modelo hidrogeológico conceptual simplificado para un año medio**, contemplando además dos escenarios: el primero, el original en el que aún existía bombeo en los pozos de la zona de estudio y el segundo, aquel correspondiente a la situación después del cese del bombeo -establecida actualmente en la cuenca del Turón-, cuando comienza la inundación.

De los aproximadamente 2.140 l/s que caen en forma de precipitación en la cuenca estudiada, una cantidad cercana al 60% se evapotranspira, como se deduce del estudio climático. El resto se divide entre escorrentía superficial e infiltración. La cuenca del río Turón tiene un área de 58,99 km².

La lluvia útil, estimada como ya se ha dicho, en unos 510 mm en la zona de estudio, corresponde a 970 l/s. La infiltración en la cuenca del Turón, que como ya se dijo se supone que coincide con el agua bombeada de los pozos, es de 270 l/s, lo que supone un 23% de la lluvia útil en la cuenca. Finalmente, el aporte de la precipitación a los cauces en forma de escorrentía superficial se estima en unos 700 l/s. Hay que decir que estas cifras no son más que estimativas y preliminares, y sería deseable disponer de datos de aforos del río Turón, así como de los volúmenes bombeados en los pozos, durante un mayor periodo

de tiempo, para poder realizar un balance hídrico más ajustado.

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 asigna a la infiltración un valor de 270 l/s, que se corresponde con el valor medio bombeado por los pozos y que es el valor obtenido por diferencia de la precipitación.

Podemos analizar dos escenarios: el primero, el original en el que aún existía bombeo en los pozos de la zona de estudio (Figura 99), y el segundo, aquel correspondiente a la situación después del cese del bombeo -establecida actualmente en la cuenca del Turón-, cuando comienza la inundación (Figura 100).

Durante el bombeo, el nivel piezométrico se encuentra deprimido y prácticamente toda el agua que se infiltra es vertida nuevamente al río. La suma del bombeo medio de los pozos del valle del Turón (Figaredo, San José y Santa Bárbara) es de 225 l/s. El vertido del Pozo Barredo (45 l/s), aunque conectado con el Pozo Figaredo, iba directamente al río Caudal. Redondeando estos números, obtenemos que el río Turón llevaría en su desembocadura al río Caudal, a la salida de la zona de estudio, un caudal de 925 l/s, resultado de la lluvia útil y del bombeo de los pozos.

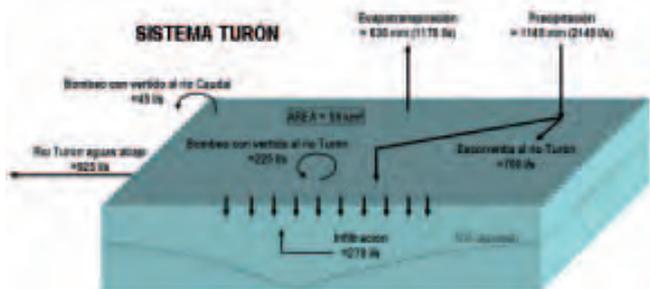


Figura 99. Modelo conceptual simplificado de balance hídrico en la zona de estudio para un periodo anual durante la fase de bombeo

En el segundo caso, que como se ha indicado anteriormente corresponde a la situación de la zona de estudio tras la interrupción del bombeo en los pozos del valle del Turón y la consiguiente inundación de las labores, por lo que el nivel piezométrico se recupera debido a la infiltración en la zona. Esto genera que no exista el aporte de 225 l/s al río Turón que se tenía en el caso anterior debido al bombeo, por lo que en su desembocadura al río Caudal aportaría un caudal de 700 l/s (Figura 100).

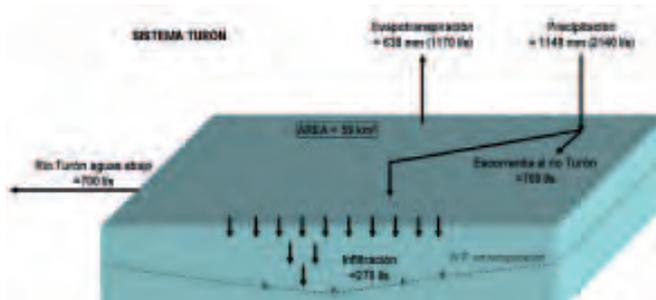


Figura 100. Modelo conceptual simplificado de balance hídrico en la zona de estudio para un periodo anual tras la interrupción del bombeo

5.7.2 Regulación del embalse subterráneo

Tomando la suma de los caudales bombeados en los pozos Barredo y Figaredo para el año 2005 y suponiendo que Mieres tiene 27.000 habitantes con un consumo constante por habitante y día de 172 l (media de Asturias), observamos, que según la gráfica de la Figura 102, el consumo máximo que se podría satisfacer es de 0,35 Hm³/mes, es decir 4,2 Hm³/año (teóricamente suficiente para abastecer a 67.800 personas).

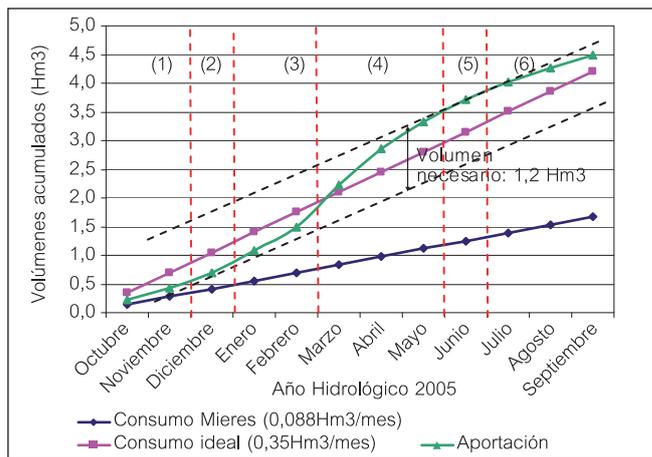


Figura 101. Gráfica de aportaciones acumuladas

Como se observa en la gráfica de aportaciones acumuladas, en los meses de julio a noviembre (periodo en el que la pendiente de la recta de la demanda es superior a la de la tangente de la curva de caudal aportado, que se corresponden con los periodos 1 y 6), de no existir regulación, no sería posible el abastecimiento. En junio y diciembre, periodos en los que ambas pendientes coinciden, podría abastecer justo lo necesario y en el periodo de enero a mayo (secciones 3 y 4), sobraría agua.

Si se representa la demanda estimada (0,35 Hm³/mes), supuesta constante durante todo el año, en la curva de caudales clasificados, se observa que se podría abastecer la misma durante más de 6 meses. La regulación mediante el embalse subterráneo garantizaría que el volumen almacenado en ese tiempo compensase las deficiencias en el tiempo restante.

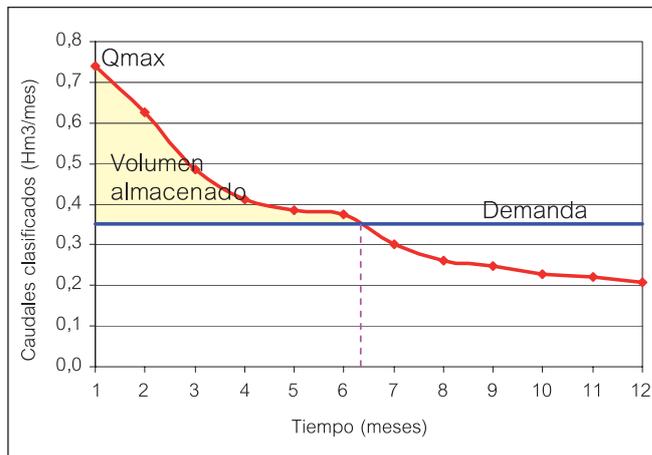


Figura 102. Gráfica caudales clasificados-demanda

De acuerdo con los cálculos de volumen de huecos realizado, y considerando una inundación hasta 70 m por debajo del brocal del pozo Barredo (cota +150 m.s.n.m.), se ha calculado (apartado 5.3 'Cubicación de volúmenes de huecos') un volumen aproximado de 6,2 Hm³. En este caso, se considera el sistema Barredo-Figaredo como aislado.

Supongamos en un cálculo simplificado un embalse de 6 Hm³ y consideremos como caudales medios mensuales de aportación (bombeo) los antes utilizados de 2005. Todas las cifras de volúmenes que se citan a continuación están expresadas en Hm³.

Si suponemos el embalse vacío al inicio del año, se tendrían las variaciones a lo largo del año expresadas en la tabla 45. Se observa que el déficit de los últimos 6 meses del año es suplido con la reserva acumulada en la primera mitad del mismo, llegándose a una ocupación máxima del 15% de la capacidad total en el mes de Junio.

	Consumo	Aportación	Variación	Acumulado
Enero	0,35	0,38	0,03	0,035
Febrero	0,35	0,41	0,06	0,097
Marzo	0,35	0,74	0,39	0,486
Abril	0,35	0,63	0,28	0,762
Mayo	0,35	0,49	0,14	0,898
Junio	0,35	0,37	0,02	0,923
Julio	0,35	0,30	-0,05	0,875
Agosto	0,35	0,25	-0,10	0,774
Septiembre	0,35	0,23	-0,12	0,650
Octubre	0,35	0,22	-0,13	0,520
Noviembre	0,35	0,21	-0,14	0,378
Diciembre	0,35	0,26	-0,09	0,288

Tabla 45. Variación del embalse subterráneo a lo largo de un año tipo suponiendo el embalse vacío al principio del año

Si se extendiesen en el tiempo estas condiciones, supuestas constantes, el volumen almacenado en el embalse iría aumentando hasta ser completo en el año 19^o, a partir del cual se produciría un rebose total de 0,3 Hm³ en los meses de Abril a Junio.

Si el análisis parte de un embalse completamente lleno, en los 6 primeros meses del año habría un superávit de casi 1 Hm³ (1/6 de la capacidad del embalse) y a partir del segundo año se estabilizaría éste de forma análoga al escenario anterior, con un rebose total de unos 0,3 Hm³/año.

Se ve con estos datos que, dadas las aportaciones existentes, el consumo no podría incrementarse mucho más, aún cuando el volumen de embalse fuese mayor. La posibilidad de un mayor aprovechamiento vendría de poder recargar el embalse subterráneo con agua del río en épocas de crecida, lo que permitiría jugar con un mayor embalse de regulación y por tanto satisfacer más demanda. Obviamente, sería necesario conocer de forma

precisa la infiltración (aportaciones) para año medios, húmedos y secos.

	Consumo	Aportación	Variación	Acumulado	Rebose
Enero	0,35	0,38	0,03	6,00	0,035
Febrero	0,35	0,41	0,06	6,00	0,062
Marzo	0,35	0,74	0,39	6,00	0,390
Abril	0,35	0,63	0,28	6,00	0,275
Mayo	0,35	0,49	0,14	6,00	0,137
Junio	0,35	0,37	0,02	6,00	0,024
Julio	0,35	0,30	-0,05	1,95	
Agosto	0,35	0,25	-0,10	1,85	
Septiembre	0,35	0,23	-0,12	1,73	
Octubre	0,35	0,22	-0,13	1,60	
Noviembre	0,35	0,21	-0,14	1,46	
Diciembre	0,35	0,26	-0,09	1,37	
TOTAL					0,923

Tabla 46. Variación del embalse subterráneo a lo largo de un año tipo suponiendo el embalse lleno al principio del año

Por ejemplo, bastaría "importar" durante los seis meses de déficit (2ª mitad del año) un caudal de agua del río Aller de 130 l/s (algo perfectamente soportable por el río, pues su caudal medio es de 6,7 m³/s y su caudal ambiental de 700 l/s; ver gráfica), recargando así el embalse, para poder dar el doble de demanda, es decir, 0,7 Hm³/mes (abastecimiento teórico de 135.600 personas), minimizando el rebose, que sería sólo de 0,13 Hm³, entre los meses de Mayo y Junio.

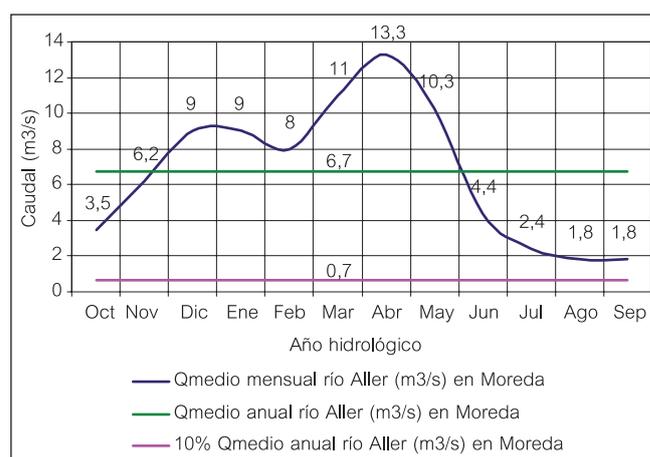


Figura 103. Caudal medio y ambiental del río Aller, a la altura de Moreda

5.8 Demanda de consumos domésticos, industriales y de agua caliente, calefacción y refrigeración de la zona de estudio

Además de los grandes clientes potenciales del entorno de la zona de estudio (edificios del Campus de Mieres, nuevo Hospital Álvarez Buylla, Centro comercial Cau-

dalia, EROSKI, urbanizaciones de nueva construcción, etc.), a partir de la información facilitada por HUNOSA y las encuestas realizadas, se consideran como posibles “pequeños” clientes, las empresas ubicadas en los polígonos industriales de Gonzalín, Vega de Arriba, la Cuadriella

(Término Municipal de Mieres) y de Senriella y Sovilla (Término municipal de Ujo), además de consumidores particulares ubicados cerca del pozo Barredo. Los datos recopilados se detallan en las siguientes tablas (Tabla 47, Tabla 48, Tabla 49 y Tabla 50).

Polígono Industrial Gonzalín (Mieres)								
Ref.	Nombre Empresa	Actividad	Red Municipal			Captación propia		Pozos cercanos
			Consumo mensual (m3)	Calidad (m3)	Tarifa	Consumo (m3)	Calidad (m3)	
124	Asturias Cerrajería, S.L.	Transformación del aluminio y el hierro	Agua sanitaria	R.D. 140/2003	No doméstica*			Pozo Barredo
126	Carpintería Metálica Valle del Caudal	Trabajo en hierro, aluminio, acero inoxidable	Agua sanitaria	R.D. 140/2003				Pozo Barredo
130	Cristalería Arsam	Instalaciones de cristalería	7	R.D. 140/2003	No doméstica*			Pozo Barredo
129	Hierroa Allende	Material de forja y fundición	Agua sanitaria	R.D. 140/2003	No doméstica*			Pozo Barredo
128	Hierros Lopez Sarasua	Almacén, venta y corte de hierro	Agua sanitaria	R.D. 140/2003	No doméstica*			Pozo Barredo
127	Meycomi (Metales y Construcciones de Mieres, S.L.)	Hierro, acero inoxidable, forja, estructuras	Agua sanitaria	R.D. 140/2003	No doméstica*			Pozo Barredo
122	Rocas Decorativas del Norte (Marmolería Rodenor)	Trabajo de piedra	Agua sanitaria	R.D. 140/2003	No doméstica*	Bajo (recirculan agua)	Pozo propio	Pozo Barredo
123	Sistema Diedrico S.L.	Rótulos de vinilo, luminosos, neón...	Agua sanitaria	R.D. 140/2003	No doméstica*			Pozo Barredo
125	Persianas Principado	Fabricación, instalación de persianas de PVC y aluminio	Agua sanitaria	R.D. 140/2003	No doméstica*			Pozo Barredo

Tabla 47. Relación de empresas del Polígono Industrial de Gonzalín e información recopilada

Polígono Industrial Vega de Arriba								
Ref.	Nombre Empresa	Actividad	Red Municipal			Captación propia		Pozos cercanos
			Consumo mensual (m3)	Calidad (m3)	Tarifa	Consumo (m3)	Calidad (m3)	
134	Air Liquide	Gases industriales	Agua sanitaria	R.D. 140/2003	No doméstica*			Pozo Barredo
131	Aluprinca	Puertas, ventanas... de aluminio y acero inoxidable	Agua sanitaria	R.D. 140/2003	No doméstica*			Pozo Barredo
135	Centro de Empresas del Caudal	Vivero de empresas	45	R.D. 140/2003	No doméstica*			Pozo Barredo
133	Marmoles J, Llaneza, S.L.	Elaboración de piedra natural	35	R.D. 140/2003	No doméstica*	?	Pozo propio	Pozo Barredo
132	Riman, S.A.	Fundiciones y talleres						Pozo Barredo

Tabla 48. Relación de empresas del Polígono Industrial de Vega de Arriba e información recopilada

Polígono Industrial La Cuadriella								
Ref.	Nombre Empresa	Actividad	Red Municipal			Captación propia		Pozos cercanos
			Consumo mensual (m3)	Calidad (m3)	Tarifa	Consumo (m3)	Calidad (m3)	
138	Aceros y Aluminios del Principado, S.A.	Reciclado de motores	25	R.D. 140/2003	No doméstica*			Pozo S. José; Pozo Figaredo
136	Alistonados Asturias, S.A.	Fabricación de tableros alistonados	Agua sanitaria	R.D. 140/2003	No doméstica*			Pozo S. José; Pozo Figaredo
139	Construcciones Mecánicas Uruña, S.A.	Fabricación elementos calderería pesada y grandes mecanizados.	Agua sanitaria	R.D. 140/2003	No doméstica*			Pozo S. José; Pozo Figaredo
140	Laboratorio Dias Europa, S.A.	Fabricación de productos farmacéuticos	2-8 m3/día	R.D. 140/2003	No doméstica*			Pozo S. José; Pozo Figaredo
137	Zitron Manutencion, S.A.	Plataformas niveladoras, puertas rápidas, puntos de carga...	Agua sanitaria	R.D. 140/2003	No doméstica*			Pozo S. José; Pozo Figaredo

Tabla 49. Relación de empresas del Polígono Industrial de La Cuadriella e información recopilada

Polígonos Industriales de Senriella y Sovilla (UJO)								
Ref.	Nombre Empresa	Actividad	Red Municipal			Captación propia		Pozos cercanos
			Consumo mensual (m3)	Calidad (m3)	Tarifa	Consumo (m3)	Calidad (m3)	
147	Cevisa	Fábrica de estructuras de madera						Pozo Santiago; Pozo San Antonio
146	Fachadas y Estructuras Prefabricadas, S.A.	fabricación de prefabricados de hormigón	210	R.D. 140/2003	No doméstica*			Pozo Santiago; Pozo San Antonio
145	La Union	Materiales de construcción	-			Pequeño (sin contabilizar)	Pozo propio y manantial	Pozo Santiago; Pozo San Antonio
143	Maderas La Viuda, S.L.	Aserradero	-			Pequeño (sin contabilizar)	Pozo propio y manantial	Pozo Santiago; Pozo San Antonio
144	Talleres Mecánicos R. Los Alvarez, S.L.	Talleres de vehículos	-			100	Pozo propio y manantial	Pozo Santiago; Pozo San Antonio

Tabla 50. Relación de empresas del Polígono Industrial de Senriella y Sovilla e información recopilada

Asimismo, se consideró la opción de ofertar el servicio de calefacción a los centros de educación ubicados en el Término Municipal de Mieres, dado que su proximidad a los pozos permitiría reducir los costes de dicho servicio en los mismos. La relación de centros ubicados en las proximidades de los pozos de la zona de estudio se detalla en la tabla 51.

Denominación específica	Localidad	Domicilio
C.P. "Las Vegas"	Figaredo	Las Vegas, s/n
C.P. "Santa Cruz"	La Barraca	La Barraca
C.P. "Ablaña-Pereda"	La Pereda	La Pereda
C.P. "Vega de Guceo"	La Veguina	Vega de Guceo
C.P. "Aniceto Sela"	Mieres (Capital)	Avda. Manuel Llaneza, s/n
C.P. "Liceo Mierense"	Mieres (Capital)	Avda. Manuel Llaneza, s/n
C.P. "Llerón-Clarín"	Mieres (Capital)	Vega de Arriba
C.P. "Santiago Apostol"	Mieres (Capital)	Numa Guilhou, 36
C.P. "Teodoro Cuesta"	Mieres (Capital)	Eduardo Martínez Torner, s/n
Centro de Educación de Personas Adultas del Caudal	Mieres (Capital)	Siete Fuentes, s/n
Col. "Lastra"	Mieres (Capital)	Clara Campoamor, s/n
Col. "Santo Domingo de Guzmán"	Mieres (Capital)	Manuel Llaneza, 22
Conservat. Municipal Elemental de Música de Mieres-Aller-Lena	Mieres (Capital)	Jeronimo Ibran, 2
E.E.I. "Les Xanes"	Mieres (Capital)	Numa Guilhou, 36
Escuela Oficial de Idiomas	Mieres (Capital)	El Batán, s/n
I.E.S. "Bernaldo de Quirós"	Mieres (Capital)	La Villa, s/n
I.E.S. "El Batán"	Mieres (Capital)	El Batán
I.E.S. "Sánchez Lastra"	Mieres (Capital)	Reineiro García, s/n
I.E.S. "Valle de Turón"	Mieres (Capital)	Santa Marina, s/n
C.P. "Murias"	Murias	Murias
Colegio Público de Rioturbio	Rioturbio	Rioturbio
C.E.E. "Santullano"	Santullano	La Venta, s/n
C.P. "Santullano"	Santullano	Santullano
C.P. "Santa Eulalia"	Ujo	Barrio Cortina - Ujo
Col. "La Salle"	Ujo	Julio Rguez. Vigíl, s/n
Colegio Público de Villapendi	Villapendi	Villapendi - Turón

Tabla 51. Relación de centros de educación ubicados en el Término Municipal de Mieres

Con todos los posibles clientes próximos a los pozos Barredo y Figaredo se ha mantenido contacto telefónico o a través de correo electrónico, planteándoles si estarían interesados en el suministro de calefacción/refrigeración y/o agua procedente del aprovechamiento del embalse minero Barredo-Figaredo. Aunque la mayoría no se ha pronunciado o bien no ha manifestado interés, por tratarse, por ejemplo, de naves industriales alquiladas y sin sistemas de calefacción, ha habido algún caso en el que sí se ha concretado esta posibilidad de aplicación, como por ejemplo el Instituto de Enseñanza Secundaria "Bernaldo de Quirós".

5.9 Análisis técnico-económico del aprovechamiento hídrico y energético

5.9.1 Aplicación de la bomba de calor a las aguas de mina de la cuenca central asturiana

Para evaluar el potencial térmico de las explotaciones de HUNOSA en la Cuenca Central, se parte de una temperatura media de desagüe de 20°C, un caudal desagüado anual de 30Hm³ y un funcionamiento horario del desagüe de 24 horas diarias. Se considera el salto térmico que optimiza el rendimiento energético (Jardón, 2008).

El potencial térmico del foco frío sería:

$$P_f = (\Delta T \times V \times C_e \times \rho) / t (W_t),$$

donde:

- ΔT = Salto térmico, que en el caso de las bombas de calor habituales es de 5°C
- V = Volumen evacuado en un tiempo t , que en este caso sería de $30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
- C_e = Calor específico del agua = 4186,8 J/kg·°C
- ρ = Densidad del agua = 1000 kg/m³
- t = tiempo considerado, que en este caso es un año = $365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}$

Sustituyendo:

$$P_f = 5^\circ\text{C} \times 30 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \times 4186,8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \times 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \times 1 / (365 \cdot 24 \cdot 3600) \text{ s}^{-1} W_t$$

$$P_f \approx 19,91 \text{ MW}_t$$

El cociente entre la cantidad de energía generada y la necesaria para la operación de la bomba de calor se conoce como COP. Para las condiciones de temperatura del agua disponible, que en este caso son del orden de 12°C-17°C o incluso superiores, las bombas de calor agua-agua habituales ofrecen valores de COP $\geq 5,4$, 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:

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

$$W_e \approx 4,53 \text{ MW}$$

Aunque es evidente que la aplicación de bombas de calor adaptadas a temperaturas del foco frío de 20°C y condiciones de funcionamiento de 15°C-20°C, aumentaría el COP, considerando el rendimiento de las bombas de calor habituales se tiene que un consumo de 4,5MW^{eléctricos} generaría una potencia térmica de calefacción de 19,9+4,5 = 24,4 MW_t.

Puesto que, como se ha dicho, la bomba estaría disponible durante 24 horas diarias, supondría una energía térmica anual disponible para calefacción de $24,4 \cdot 24 \cdot 365 = 214.097 \text{ MWh}_t$ al año, consumiendo únicamente $4,5 \cdot 24 \cdot 365 = 39.683 \text{ MWh}_{\text{eléctricos}}$.

Asimismo, los precios del kWh_t para generar esa misma energía térmica mediante caldera de gas, por ejemplo, serían muy superiores al obtenido con la bomba de calor y además con el empleo de esta última se conseguiría un considerable ahorro en las emisiones de CO_2 .

Aplicación de la bomba de calor al agua del Pozo Barredo (Mieres)

Como aplicación más concreta e inmediata, se plantea la utilización de la bomba de calor para el suministro de calefacción a los edificios de la Universidad de Oviedo en el Campus de Mieres, -donde están recién construidos o en construcción varios edificios de investigación, docencia y deportivos-, así como un hospital, un centro comercial y nuevas urbanizaciones, a través del desagüe concentrado en el cercano pozo Barredo.

La Dirección de Nuevos Desarrollos del Grupo HUNOSA ha llevado a cabo, durante los tres últimos años, en colaboración del el Instituto Geológico y Minero de España y la Universidad de Oviedo, una investigación del potencial geotérmico de las aguas de mina que culmina con el proyecto piloto de abastecimiento de energía geotérmica a las nuevas instalaciones del Campus de Barredo, utilizando las aguas de mina del Pozo Barredo, en Mieres. Los autores de este trabajo agradecen la cortesía de HUNOSA al facilitar la información actualizada que a continuación se presenta.

Para evaluar la viabilidad técnica del proyecto, los parámetros fundamentales que requieren un estudio en profundidad son tres: caudal de agua disponible, capacidad de regulación y temperatura de las aguas. Asimismo es importante conocer la calidad de las aguas con el fin de garantizar en todo caso la seguridad de los equipos empleados.

Según los caudales desaguados del Pozo Barredo durante los últimos seis años, se dispone de una media superior a $4 \text{ Mm}^3/\text{año}$, que conforme a los estudios técnicos representa $2,65 \text{ MW}_t$ térmicos aprovechables, sin necesidad de reinyección de las aguas (Cordero et al., 2009).

Infraestructura de los servicios geotérmicos del campus de mieres

Las instalaciones constan de dos edificios cuyo propietario es la Universidad de Oviedo. El primero corresponde a un Centro de Investigación: se trata de un edificio de uso docente que dispone de una planta sótano y de seis plantas sobre rasante (plantas baja, primera, segunda, tercera, cuarta y bajo cubierta). El edificio tiene una superficie total de 57.393 m^2 , correspondientes a un volumen de 191.012 m^3 . La fachada principal tiene orientación Oeste, siendo un edificio exento, es decir, sin medianerías con otros edificios, por lo que todas sus fachadas son exteriores. El sistema de distribución de calor/frío

está formado fundamentalmente por sistemas de fan coils a cuatro tubos, funcionando a 50°C para calefacción y 7°C en refrigeración. En el caso de este edificio las necesidades térmicas de calor y frío pueden quedar totalmente cubiertas con el empleo del sistema geotérmico a excepción de la refrigeración requerida por los grandes equipos de tratamiento de datos, que debido a sus condicionantes particulares queda cubierta con sistemas autónomos.

El segundo edificio es una Residencia de Estudiantes. Se trata de un edificio de planta rectangular aislado, por tanto cuenta con cuatro fachadas al exterior. El edificio ocupa una parcela de 5.225 m^2 , y desde la fase de proyecto planteaba un sistema de distribución de calor por suelo radiante, con una temperatura de impulsión de 35°C . Este edificio no contempla la posibilidad de empleo de refrigeración y sus necesidades calóricas se cubren totalmente con el sistema geotérmico (Cordero et al., 2009).

La ejecución de la instalación puede dividirse en tres partes fundamentales:

- Sistema de Bombeo del Pozo Barredo, que provee el caudal de agua necesario para el correcto funcionamiento del sistema geotérmico.
- Sistema de distribución del agua hasta los edificios. En este caso se trata de tuberías presaisladas enterradas que transcurren por zanja. Se trataría de una tubería principal de la que se extraería el caudal necesario para cada edificio, y las tuberías de salida de los edificios con objeto de verter de nuevo el caudal al río.
- Sistemas de generación instalados en los distintos edificios, es decir, las propias bombas de calor y los dispositivos auxiliares necesarios para su correcto funcionamiento.

Sistema de bombeo

Para la extracción del caudal de agua demandado por las instalaciones ($120 \text{ m}^3/\text{h}$ para el Centro de Investigación y $60 \text{ m}^3/\text{h}$ para la Residencia de Estudiantes) se ha comenzado por adecuar el sistema de bombeo del pozo. Para ello se ha colocado una losa de hormigón sobre la que van suspendidas dos bombas sumergibles GRUNFOS SP-215-4-AA de caudal nominal $215 \text{ m}^3/\text{h}$ y altura nominal 60 m. Cada una de las bombas posee su propia tubería de impulsión. Para esta aplicación se ha seleccionado una tubería flexible Rylbrun autoportante de caucho con refuerzo de poliéster que impide las incrustaciones calcáreas (ver Figura 104).

Las bombas se han colocado a dos alturas: 100 y 200 m bajo la superficie, de cara a aprovechar la posible estratificación de temperaturas en el agua, de forma que en los periodos en que la demanda de calefacción prime sobre la de climatización, se utilizará el agua procedente de la bomba más profunda, mientras que en el verano, cuando primen las necesidades de refrigeración, se emplearán aguas más superficiales. Esta duplicidad permite también garantizar la continuidad en el suministro, ya que en todo momento existe una bomba que actúa como auxiliar (Cordero et al., 2009).



Figura 104. Sistema de bombeo instalado en el pozo Barredo (cortesía de HUNOSA)

Esquema de distribución

Para la distribución del agua de mina hasta los edificios (distancia aproximada 250 m) se emplearon dos tuberías independientes, una por edificio (ver siguiente figura). En ambos casos se trataba de tubería preaislada de polipropileno multicapas, de la serie Niron de Italsan. En el caso del Centro de Investigación se utilizó diámetro 6" y para la Residencia de Estudiantes se emplea un diámetro de 4". En las zonas en que la tubería no discurre por zanja

se utiliza además un aislamiento de fieltro ligero de lana de vidrio, aglomerado de resinas termoendurecibles y se recubre de una chapa de aluminio para su protección.

El agua de retorno una vez aprovechada su temperatura se vierte a través de un canal preexistente al Arroyo Duró (al que se vertía el desagüe del pozo durante la fase activa de la mina). Para conectar el desagüe de los edificios a dicho canal se ha utilizado tubería de polietileno conectado mediante electrofusión (Cordero et al., 2009).

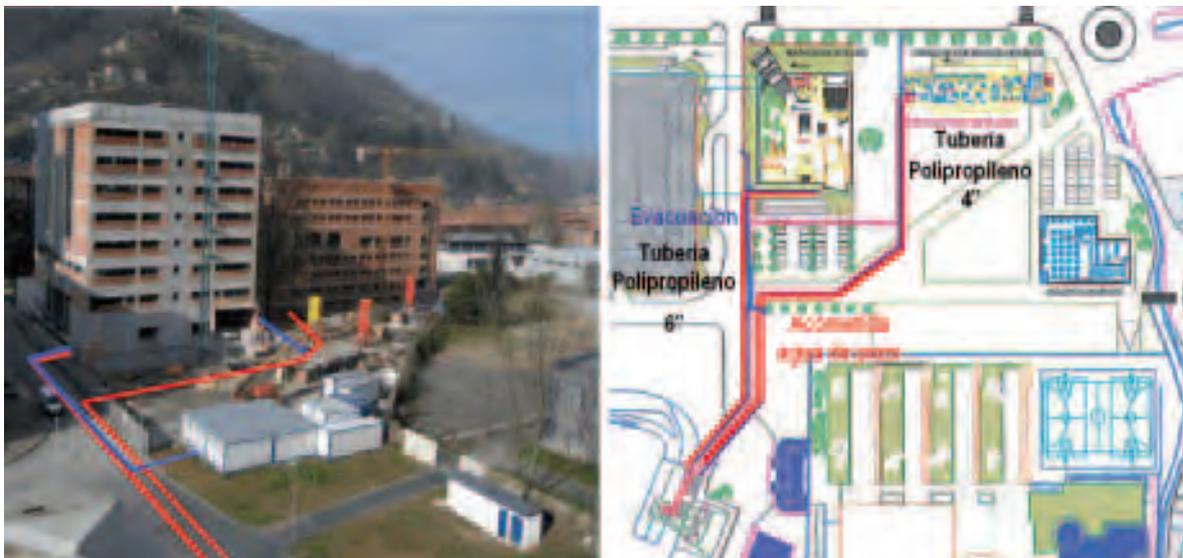


Figura 105. Esquema del sistema de distribución (cortesía de HUNOSA)

Equipos de generación

Cada uno de los edificios está dotado de su propia sala de generación. En ambos casos se dispone de un depósito de acumulación del agua de mina con el fin de acomodar los ciclos de arranque- parada de las bombas (Cordero et al., 2009).

En el caso del Centro de Investigación, dado que se prevé una alta simultaneidad en la demanda de frío y

calor, se utiliza un sistema de generación compensado empleando dos enfriadoras RTWB 210 (potencia calorífica 362 kw cada unidad). Ambas bombas funcionarían produciendo agua caliente a 50°C-45°C y simultáneamente, en el foco frío, agua a 7°C, que tras atravesar el circuito de refrigeración retornaría a 12°C. En el momento en que las necesidades de calor y frío del edificio se desequilibraran, se emplearía el agua de mina como fluido de

compensación. Cuando las necesidades de frío superen a la demanda de calor, el agua de mina actuaría disminuyendo la temperatura del agua caliente de retorno a través de un intercambiador de calor de placas (UFP 102/55). En el caso contrario, en invierno, cuando el edificio no sea capaz de consumir todo el frío que requiere el sistema para funcionar compensado, el agua de mina se encargará de aportar el calor necesario (a través de un segundo intercambiador) para que la máquina pueda funcionar con el salto térmico adecuado. De esta forma, en los momentos en los que sea necesaria calefacción y refrigeración simultánea, la misma máquina producirá frío y calor con un único consumo eléctrico, lo que reduce drásticamente el consumo de energía primaria, sus emisiones asociadas, y la factura eléctrica final del consumidor. Se dispone además de una caldera auxiliar de gas natural (550 kw) para garantizar la absoluta seguridad en el suministro, como se ve en la figura siguiente (Figura 106).

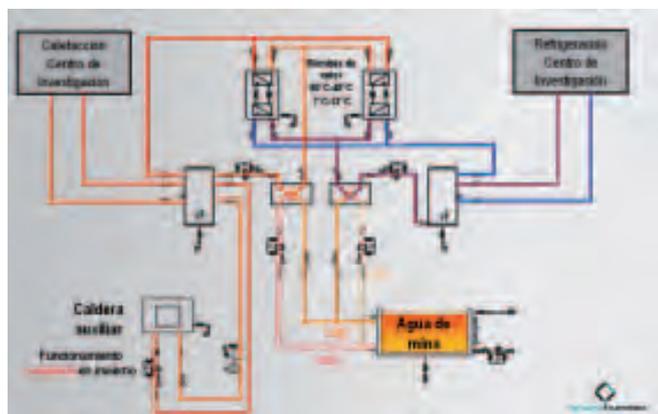


Figura 106. Esquema de funcionamiento sistema geotérmico a cuatro tubos Centro de Investigación (cortesía de HUNOSA)

En el caso de la Residencia de Estudiantes, el esquema es más sencillo al no existir demanda de refrigeración. El equipo de generación es una enfriadora RTWB 207 que producirá calor a una temperatura de 35°C, con retorno a 30°C. Como fluido frío utilizará agua de mina a través de un circuito secundario con intercambiador de calor intermedio (UFP-54/50) con el fin de evitar problemas de calcificación en la enfriadora. Al igual que ocurre en el Centro de Investigación, el sistema queda duplicado con la instalación de una caldera de gas MGK de 250 kw (Cordero et al., 2009)..

Previsión de resultados de los servicios geotérmicos del campus de mieres

De acuerdo al coeficiente de funcionamiento de los equipos instalados que el fabricante indica, para las temperaturas de diseño de los focos frío y caliente, en el caso de la Residencia de Estudiantes la obtención de una potencia final de 276 kw, se precisaría un aporte externo de potencia, consumida en el compresor, de 53 kw, aprovechándose 223 kw de potencia, de la energía de baja temperatura contenida en el caudal de agua de mina bombeado por el Pozo Barredo. En el caso del Centro de Investigación, el rendimiento estacional previsto es de 5,

aunque está en función de la climatología, al depender de las necesidades de calor y frío que se den de manera simultánea (Cordero et al., 2009).

Para el cálculo del balance energético se dispone de las previsiones de demanda de calor y frío de cada uno de los edificios, así como la previsión del consumo eléctrico total de los equipos de generación. Para cubrir dichas necesidades se ha calculado un volumen total de agua de mina necesario de 199.997 m³ para el Centro de Investigación y 83.335 m³ para consumo de la Residencia de Estudiantes.

La realización de un análisis comparativo de los consumos energéticos finales de calefacción y refrigeración anuales de ambos edificios en relación a los que tendrían si se tratara de sistemas de climatización convencionales debemos de añadir el resto de consumos implicados directamente con al utilización del servicio geotérmico. No se considerarán, pues, los consumos de bombas de circulación que deberían de emplearse con independencia del sistema de producción de calor y frío elegido. En el caso del empleo de un sistema geotérmico utilizando aguas de mina cabría pensar en distintos consumos energéticos (Cordero et al., 2009):

- Extracción de las aguas del interior de la mina: Este es un consumo energético que no puede ser imputado al sistema geotérmico, puesto que por razones de seguridad es imprescindible desaguar el pozo de todas formas, para evitar riesgo de inundación de núcleos poblacionales. El pozo desagua una media de 4 Mm³ anuales que deben ser bombeados con independencia de que su potencial térmico se use o sea desaprovechado.
- Energía necesaria para la distribución del agua hacia los edificios: En el proyecto, la diferencia de cota entre el brocal del pozo Barredo y los depósitos de agua de los dos edificios es tal que permite el transporte por gravedad de las aguas, por lo que no es necesario el uso de sistema de bombeo.
- Circulación del agua desde los aljibes a los intercambiadores de calor: En el caso del Centro de Investigación se dispone de dos bombas, una para el circuito de calor y otra en el de frío de 2,61 kw y 2,70 kw respectivamente. Para la Residencia de Estudiantes se emplea una bomba de 0,70 kw de potencia.
- Finalmente, se ha de añadir a estos cálculos la energía necesaria para bombear el agua de mina exhausta al punto de vertido al río. Para ello se utiliza una bomba de evacuación, que en el caso de la Residencia de Estudiantes tiene una potencia de 1,98 kw, y en el Centro de Investigación alcanza una potencia total de 3,56 kw.

Una vez conocidos todos los consumos estamos en disposición de analizar el balance energético total del sistema. En la siguiente Tabla se compara con un sistema convencional, funcionando con caldera de gas natural (rendimiento 85%), para la producción de calefacción, y enfriadoras de aire con un SPF=3 para abastecer las necesidades de refrigeración.

	Kwh calor	Kwh frio	Kwh eléctricos convencionales	Consumo agua de mina (m3)	Kwh equipos auxiliares	Consumo energético total (Kwh)
Geoterminia Centro de Investigación	520.997	669.152	236.003	199.997	11.585	247.588
Geoterminia Residencia de Estudiantes	274.553	0	52.433	83.335	4.208	56.641
Sistema convencional ambos edificios	795.550	669.152	1.158.992	0	0	1.158.992

Tabla 52. Consumo energético anual del sistema geotérmico y sistema convencional (Cortesía de HUNOSA)

De los datos anteriores se comprueba que el ahorro energético alcanzará el 74%. La aplicación de este sistema conseguiría, además, un considerable ahorro en las emisiones de CO₂, ya que para generar esa misma energía térmica durante un año, el uso de tecnologías convencionales (caldera de gas natural y enfriadora de aire) se emitirían 335,7 t de CO₂, mientras que con el sistema geotérmico planteado se consumirían 304,2 MWh^{eléctricos} que, a razón de 0,649 t de CO₂ por MWh (ATECYR, 2007), suponen una emisión de 197,5t de CO₂ (Cordero et al., 2009).

Por todo esto, se considera que la aplicación del sistema de bomba de calor vendría a mejorar la economía y sostenibilidad medioambiental de los edificios en los que el proyecto se implemente, 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.

En la actualidad, los sistemas de bomba de calor se pueden considerar como **fuentes de energía renovable**, dado el bajo consumo energético que necesita, y la alta proporción de energía renovable utilizada. En cualquier caso, los cálculos de emisiones de CO₂ anteriores están realizados para el peor de los casos, en los que la energía necesaria para la marcha del compresor, se obtuviese directamente de la red, pero dada la escasa potencia necesaria para este fin, sería interesante que dicha energía fuese generada mediante la utilización de paneles solares, no existiendo entonces duda de las **ventajas medioambientales** del sistema.

5.9.2 Aprovechamiento mediante minicentral hidráulica de las aguas de mina de la Cuenca Central Asturiana

En el apartado 4.9.2 se expone la posibilidad de aplicación de una minicentral hidráulica al agua de retorno al pozo Barredo, una vez utilizada para las aplicaciones de bomba de calor expuestas. En ese apartado fue calculado el salto y se presentaron las expresiones que, a partir de ciertas hipótesis, permitirán obtener la **potencia instalada** y la **producción media** de la turbina, como sigue:

Con un salto neto de 72,5 m y un caudal de 0,6 m³/s, la potencia instantánea sería:

$$P = 8,34 \cdot Q \cdot H_n = 362,8 \text{ kW}$$

Por tanto, en una primera aproximación, y suponiendo un caudal constante, lo cual no siempre obedecerá a la

realidad, la energía que se podría obtener con un aprovechamiento de este tipo es de aproximadamente **3.178.128 kW-h/año**.

El tipo de turbina aplicable a este caso serían las de acción: la energía potencial se transforma en energía cinética mediante un chorro de gran velocidad, que es proyectado contra unas cazoletas, fijas en la periferia de un disco; como el agua, después de chocar contra las cazoletas, cae al canal de descarga con muy poca energía remanente, la carcasa puede ser ligera y sólo tiene por misión evitar accidentes e impedir las salpicaduras del agua. Dentro de este tipo de turbinas están la Pelton, la Turgo y la de flujo cruzado o Banki-Mitchell, pero en particular, la microturbina Turgo combina funcionamiento de máxima flexibilidad con caudales mínimos y mayores alturas.

A continuación se realizará una estimación del balance económico, suponiendo que el agua se turbinará en horas punta y se bombea en horas valle.

Ingresos por turbinación

La turbina funcionará durante 16 horas diarias con un caudal de 0,6 m³/s. Los precios de venta para instalaciones de este tipo fijados por el RD 661/2007 son:

$$T_p = 2,733649 \text{ €/kw-mes}$$

$$T_e = 0,068824 \text{ €/kw-h}$$

De este modo, los ingresos anuales generados por turbinación serían:

$$\text{Ingresos} = 3.178.128 \text{ kW-h} \times 0,068824 \text{ €/kw-h} = 218.731 \text{ €}$$

Coste debido al bombeo

En este caso, **se calcula el coste asociado a devolver el caudal turbinado, aunque éste estaría incluido en el balance económico de la bomba de calor y se tendría aunque no existiese el aprovechamiento mediante minicentral hidráulica**. Teniendo en cuenta las mismas consideraciones anteriores y que el horario de bombeo sería en horas valle –siempre y cuando se dispusiese de sistemas de almacenamiento para el agua bombeada, de forma que la demanda de las aplicaciones de bomba de calor fuese satisfecha adecuadamente-, para reducir costes (bombeo de 1,2 m³/día, durante 8 h al día, de 0.00 a 8.00 a.m.), la potencia instantánea de bombeo sería:

$$P = 8,34 \cdot Q \cdot H_n = 725,6 \text{ kW}$$

El coste debido al bombeo, teniendo en cuenta el precio del kW·h consumido (tarifa 6.1), obedece a la siguiente expresión:

$$C (\text{€}) = [(T_p \cdot P_{\text{instalada}}) + (T_e \cdot \text{Kw.h}_{\text{consumidos}}) + \text{Impuesto}] \cdot \text{IVA (16\%)}$$

Donde:

T_p = Término de potencia. Es el precio fijo que se paga al mes por la disposición continuada del suministro eléctrico.

T_e = Término de energía. Es el precio que se paga por cada Kw·h consumido de electricidad.

$\text{Kw}\cdot\text{h}_{\text{consumidos}}$ = consumo anual; $725,6 \text{ Kw} \cdot 365 \text{ días/año} \cdot 8 \text{ h/día} = 2.118.694 \text{ Kw}\cdot\text{h}$

$$\text{Impuesto} = [(T_p \cdot P_{\text{instalada}}) + (T_e \cdot \text{Kw.h}_{\text{consumidos}})] \cdot 1,05113 \cdot 0,04864$$

La tarifa para instalaciones de alta tensión de menos de 36 kV es la 6.1, y el periodo escogido es el periodo 6, luego:

$$T_p = 1,686408 \text{ €/kw}\cdot\text{mes}$$

$$T_e = 0,004290 \text{ €/kw}\cdot\text{h}$$

Así, el **coste total del bombeo** sería:

$$C (\text{€}) = [(14.684) + (9089) + (1215)] \times 1,16 = \mathbf{28.987 \text{ €}}$$

Ingresos netos

Los ingresos netos se hallan restando a los ingresos obtenidos en turbinación los costes debidos al bombeo.

$$\mathbf{\text{Ingresos netos} = 189.744 \text{ €}}$$

Luego se deduce que el agua de retorno de algunos sistemas de bomba de calor al pozo Barredo, además de reponer parte del agua extraída del embalse para tal fin, permite un aprovechamiento mediante minicentral hidráulica perfectamente rentable, que ayudaría a sufragar los gastos de bombeo asociados. Los ingresos generados a partir de este aprovechamiento y aquí estimados podrían ser incrementados aumentando tanto el salto neto (colocando la turbina a menor cota) como el caudal de entrada de agua, como ya se ha dicho.

5.9.3 Aprovechamiento del agua de mina para abastecimiento

Desde el punto de vista medioambiental, este sistema de abastecimiento supone una menor necesidad de obras de transporte, ya que el suministro sería a los clientes más próximos. Además, al poder acumular el agua en el “embalse minero” esta puede ser utilizada en aquellas épocas del año en que el río presente niveles más bajos, mejorando así el mantenimiento del caudal ecológico del mismo.

Para determinar las posibilidades de aprovechamiento de las aguas mineras de la zona, es necesario disponer de datos de demanda y datos de cantidad de agua disponible (infraestructuras hidráulicas) y calidad de esta agua bombeada para determinar los sistemas de depuración necesarios para los distintos posibles usos de las mismas. En este sentido, se realizó un estudio de mercado, analizando los posibles clientes, que por su proximidad pudiesen ser abastecidos por el agua bombeada

por el Pozo Barredo, sin que la distancia al punto de abastecimiento encareciese el servicio. Los resultados, ya comentados, no resultaron muy alentadores.

Habría que tener en cuenta que, dado que el sistema de extracción del agua de mina no funciona de manera constante, sino que únicamente se bombea agua cuando el nivel de ésta en el pozo alcanza una determinada cota, existe un tiempo de contacto entre el agua y los elementos sumergidos, lo que facilita la disolución de determinadas sustancias en el agua. Es por esto que será necesario realizar un exhaustivo control de la calidad de esta agua de mina con el objetivo de darle el tratamiento necesario a esta agua para que puedan servir para el consumo humano.

Desde el punto de vista del abastecimiento de agua para consumo, las aguas suministradas deberán cumplir lo determinado en el R.D. 140/2003 por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. En el apartado 5.5 se resumen los tratamientos marcados por la Directiva Europea 75/440 CEE relativa a la Calidad del Agua Potable.

Como ya se ha comentado, a la vista de los resultados de las campañas de muestreo y análisis de las aguas bombeadas de los Pozos Barredo y Figaredo, para cumplir las exigencias del R.D. 140/2003, sería necesario someter a las aguas de ambos pozos a un tratamiento A3, que debería incluir un tratamiento físico intensivo (que consiste en un desbaste y una decantación, seguidos de un desarenado por filtración, una microfiltración y una ultrafiltración) y un tratamiento químico intensivo (que consiste en una preoxidación seguida de una coagulación o floculación, una oxidación con ozono y una electrodiálisis final).

Abastecimiento actual de agua en el municipio de mieres

Actualmente, en el municipio de Mieres (municipio en el que se encuentran los dos pozos estudiados), el agua que se consume procede principalmente del río Aller, captada ésta mediante un azud que dispone de un limpiarrejas automático. Esta agua se somete a un pretratamiento con permanganato potásico (para disminuir la contaminación orgánica). La potabilización se lleva a cabo en la ETAP de Levinco, de cuya gestión se encarga la empresa Aqualia. El tratamiento de potabilización consiste en 5 etapas: preoxidación con cloro gas, coagulación, decantación, filtración y postcloración con cloro gas.

El concejo cuenta además con otros abastecimientos menores, cuyas aguas proceden fundamentalmente de manantiales y cuyo tratamiento consiste en una desinfección con derivados del cloro (hipoclorito sódico o cloro gas).

Para asegurar la calidad del agua abastecida y en cumplimiento de la legislación vigente RD 140/2003, en todos los abastecimientos se realizan análisis periódicos consistentes en un control de la desinfección (CD), un examen organoléptico (Org), un análisis de control (control), un análisis completo (completo) subcontratado a laboratorios privados, y un control en el grifo del consumidor (grifo).

Legislación aplicable

A la hora de poner en marcha un sistema de abastecimiento, se deberá tener en cuenta tanto la legislación nacional como la autonómica.

Legislación nacional:

- Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas
- Ley 46/1999, de 13 de diciembre, de modificación de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas
- RDL 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas
- Real Decreto-Ley 4/2007, de 13 de abril, por el que se modifica el texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el RDL 1/2001, de 20 de julio
- RD 11/1995, de 28 de diciembre, sobre normas aplicables al tratamiento de aguas residuales urbanas
- RD 509/1996, de 15 de marzo, sobre tratamiento de aguas residuales urbanas

Normativa autonómica:

- Ley 1/1994, de 21 de febrero, de abastecimiento y saneamiento de aguas en el Principado de Asturias (BOPA nº 46, de 25 de febrero), modificada por:
- Ley 18/1999, de 31 de diciembre, de medidas presupuestarias, administrativas y fiscales (BOPA nº 301, de 31 de diciembre)
- Ley 4/2000, de 30 de diciembre, de acompañamiento a los presupuestos generales para el 2001 (BOPA nº 301, de 30 de diciembre)
- Decreto 19/98, de 23 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de abastecimiento y saneamiento de Aguas (BOPA nº 102, de 5 de mayo)

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A partir del trabajo realizado en el marco de esta investigación, se presentan, a modo de síntesis, las siguientes conclusiones y recomendaciones generales:

Con la introducción de la Directiva Europea Marco del Agua (FWD) surgió la necesidad de gestionar conjuntamente las aguas superficiales y subterráneas para conseguir una protección del medio hídrico a nivel de cuenca hidrográfica, con el objetivo genérico de lograr una buena calidad tanto química como ecológica de las aguas, con especial atención a evitar el deterioro de las aguas subterráneas.

La zona estudiada, ubicada en dentro de la Cuenca Carbonífera Central asturiana (en adelante, CCCA), en el sector centro-sur de Asturias, tiene la particularidad de concentrar un gran número de labores mineras cerradas o en proceso de cierre. Estas labores configuran un extraordinario “embalse subterráneo” susceptible de ser aprovechado como recurso hídrico de muy diversas maneras.

Climáticamente, esta zona se caracteriza por tener un microclima oceánico, con precipitaciones abundantes, en torno a los 1080 l/m² anuales de media, y nubosidad persistente. Las máximas lluvias tienen lugar durante los meses de invierno, periodo en el que llegan a saturar el

suelo, facilitando la escorrentía, descendiendo sensiblemente en la época estival. Térmicamente, debido a la latitud de la región, próxima a los 45° N, la zona de estudio está sujeta a una fuerte estacionalidad, sufriendo una gran variación en la radiación. No obstante, el efecto del mar amortigua las fluctuaciones de temperatura, de forma que el régimen térmico es templado, con contrastes de temperaturas moderados. A pesar del clima lluvioso y de temperaturas moderadas, en ocasiones pueden darse situaciones de aridez en los meses estivales (de Julio a Septiembre), debido a una elevada evapotranspiración con el aumento de temperaturas y a un descenso, en esta época, del régimen de lluvias. La temperatura media anual resulta ser de 13,5 °C.

Geológicamente, la zona de estudio se caracteriza por la presencia de materiales de edad Paleozoica (Sistema Carbonífero, pisos Westfaliense C-D) muy replegados y tectonizados, originando estructuras complejas. Sedimentológicamente, la zona está formada por una serie de parasecuencias costeras formadas por una sucesión cíclica de areniscas, lutitas y capas de carbón, que se agrupan en paquetes. Dado el objetivo de este estudio, el cual se centra principalmente en las características del Pozo Barredo, son de especial interés los paquetes Caleras, Generalas, San Antonio y M^a Luisa. Estos paquetes se caracterizan por la alternancia de tramos continentales arenosos, en los que aparecen las principales capas de carbón, y tramos marinos en los que predominan las litologías lutíticas. En líneas generales, los materiales presentes en la zona incluyen lutitas, limolitas, areniscas (fundamentalmente litarenitas), microconglomerados, conglomerados, calizas y capas de carbón, y depósitos cuaternarios: aluviones, eluviones, coluviones y elementos antrópicos (escombreras, rellenos compactados, rellenos heterogéneos).

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede decir que el área de estudio se caracteriza por la presencia de materiales predominantemente impermeables o muy poco permeables, que conforman un acuífero multicapa de muy baja porosidad y permeabilidad, donde las areniscas actúan como almacenes limitados, y las pizarras, lutitas y las capas de carbón como niveles confinantes. Debido a esto, las vías de circulación preferente del agua subterránea son las fracturas abiertas y las zonas de descompresión asociadas a ellas, lo que supone que el comportamiento hidráulico de la formación está más asociado a la fracturación que a la litología. Es por esto que las labores mineras de la zona adquieren un importante papel en la gestión del recurso hídrico, actuando tanto como vías de circulación como configurando acuíferos artificiales asimilables a pseudo-kársticos. Es decir, que tras décadas de actividad extractiva, donde antes había pequeños acuíferos en arenisca de un sistema multicapa de pequeña entidad se ha producido por una parte, un hueco -como consecuencia de la extracción del carbón-, y por otra, la fracturación del macizo dando lugar a un nuevo “acuífero” con una triple porosidad similar a la de los acuíferos carbonatados kársticos.

La zona de estudio, se puede dividir en dos sectores mineros: el valle del río Caudal, sector en el que se ubica el Pozo Barredo y el valle del río Turón, donde se localizan, entre otros, los Pozos Figaredo, San José y Santa Bárbara. Toda el área se vio afectada tanto por la minería de valle como por minas de montaña anteriores.

El Pozo Barredo, en el que se centra gran parte del estudio, se encuentra en el sector noroccidental del área de estudio, en la margen derecha del río Caudal; durante su actividad se explotaron principalmente los paquetes M^a Luisa, San Antonio, Generalas y Caleras del flanco occidental del Sinclinal de Barredo. La otra explotación principal considerada en este estudio es el Pozo Figaredo, situado en el tramo final del río Turón antes de su desembocadura en el río Caudal. Este pozo, que se encuentra conectado con el Pozo Barredo, explotó las capas de carbón de los paquetes Sotón y M^a Luisa, emplazadas en el sector occidental del Sinclinal de Turón.

Para la realización del estudio climático se consideraron registros de 31 estaciones termopluviométricas, cuyos datos se completaron y validaron tomando como estaciones base las estaciones de Oviedo "El Cristo" y la de Santa Cruz de Mieres, dado que se consideró que estas dos estaciones eran las que ofrecían datos más completos y fiables, dado su prolongado periodo de funcionamiento. Con las series de pluviometría y temperatura completas se procedió al cálculo de las medias anuales y mensuales para el periodo considerado, tanto por año natural como por año hidrológico. Con estos datos se elaboraron mapas de isoyetas de año seco y año húmedo, y se calculó la evapotranspiración real media (642,3 mm) y potencial media (725,5 mm) mediante el método de Thornthwaite, así como la lluvia útil (444,2 mm), el balance hídrico, las reservas, el déficit y el superávit para cada año hidrológico.

Para el estudio hidrológico del río Turón se realizaron aforos directos periódicos por el método del molinete, que fueron complementados con aforos indirectos (lecturas diarias de escalas limnimétricas instaladas en las tres secciones de aforo para este fin). Así, se obtuvo una serie diaria de caudales del río (o hidrograma). Esto permitió correlacionar los caudales aforados con la pluviometría, observándose que los máximos picos de caudal se corresponden con episodios de lluvias. En el punto de muestreo de cabecera, los caudales varían entre 50 y 600 l/s; en el punto medio, entre 143 y 1775 l/s, y el punto próximo a la salida, entre 121 y 1734 l/s. Por otro lado, cabe destacar el hecho de que en la estación de Peñule (cerca de la desembocadura) se registre, como norma general, menos caudal que en la estación La Veguina (aguas arriba de la anterior), lo cual nos indica que entre dichos puntos se produce una significativa infiltración, estimada en 61 l/s, debido, entre otras cosas, a la fracturación inducida por las explotaciones mineras próximas. El caudal medio del río Turón se estima en unos 700 l/s y su caudal ambiental en unos 70 l/s. También se ha calculado por varios métodos el caudal de máxima avenida de la cuenca del río Turón, estimándose en unos 50, 150 y 250 m³/s para tiempos de retorno de 2, 50 y 500 años, respectivamente; no

obstante, las recientes obras de encauzamiento del tramo final del río Turón, con un ensanchamiento de más de 12 m de ancho de cauce, no hacen temer por posibles desbordamientos/inundaciones tras episodios tormentosos, que se ha comprobado no suelen superar las dos horas.

A lo largo del río, el pH del agua varía entre 7,02 y 9,27; la temperatura, entre 8,46 y 20,66 °C; la conductividad eléctrica entre 0,335 y 2,517 mS/cm y el potencial de oxidación, entre 31 y 709 mV, siempre positivo. Estos valores son muy variables en las tres secciones y son claros indicadores de la presencia de agua de mina en el río (que sobre todo hace aumentar su temperatura y conductividad eléctrica), debido al vertido de agua bombeada de los pozos mineros.

Suponiendo que, dada la baja permeabilidad de los materiales de la cuenca, todo el agua que se bombea en el Pozo Barredo se corresponde con la infiltración del mismo y que el caudal de los ríos corresponde básicamente a escorrentía superficial, se calculó, mediante un balance hídrico, la infiltración en la zona de estudio, que recarga el embalse constituido por las labores de los pozos Barredo y Figaredo, y que resultó ser entre el 20 y el 23% de la lluvia útil, junto con un aporte constante procedente de la escorrentía (río), que se infiltra a través de las zonas fracturadas. El retardo medio para la infiltración quedó establecido en 19±5 días.

Según el modelo conceptual de entradas y salidas de agua establecido para la cuenca del Turón, de 59 km², se tiene que, como promedio para un periodo anual, de una precipitación de 1140 mm, se evapotranspira más del 55%, estimándose la lluvia útil en unos 510 mm. La infiltración en la cuenca del Turón, que se supone que coincide con el agua bombeada de los pozos, es de 270 l/s, mientras que el aporte de la precipitación a los cauces en forma de escorrentía superficial se estima en unos 700 l/s.

Una vez conocida la recarga se procedió a calcular el volumen de huecos del cual se disponía en el "embalse subterráneo". Para ello se analizaron los planes de labores de los Pozos Barredo y Figaredo desde 1970 hasta el cierre de las minas, obteniendo así las toneladas de carbón explotadas en cada capa por relleno y por hundimiento. Con estos datos y teniendo en cuenta la densidad del carbón, los coeficientes de reducción del hueco inicial abierto para ambos métodos de explotación y la longitud y sección de las galerías, se calculó el volumen de hueco que generaron las labores de Figaredo y Barredo y que actualmente se encuentran inundadas, para lo que fue necesario estimar el volumen de agua infiltrada durante el proceso de inundación. Esto permite estimar el recurso hídrico aprovechable del que se dispone: 3,6 Hm³ en el pozo Barredo, y 4,6 Hm³ en el pozo Figaredo, que totalizan 8,2 Hm³ para el sistema, hasta la superficie. El volumen del embalse Barredo-Figaredo hasta la cota actual de inundación (+150 m), se estima en 6,2 Hm³.

Los perfiles de temperatura y salinidad a lo largo de la caña del pozo Barredo acusan cambios a la altura de las plantas del pozo atravesadas, aumentando en general en magnitud al hacerlo la profundidad hasta llegar a la altura

de 3ª planta (cota +20), a partir de la cual se estabilizan. Como promedio, la temperatura aumenta desde unos 17 °C en contacto con la atmósfera hasta 22°C a partir de 200 m desde la superficie.

Mediante el muestreo de rocas y su estudio al microscopio en lámina delgada, así como otros ensayos en laboratorio, ha sido posible determinar las conductividades térmicas de todos los materiales atravesados por las labores mineras de Barredo, a partir de la proporción de minerales petrogenéticos en la muestra y sus conductividades térmicas, lo que constituye un primer paso de cara al establecimiento de un modelo térmico. Los valores obtenidos varían desde 1,4 W/m·K (lutita) hasta 4,7 W/m·K (cuarcarenita).

Se proponen y analizan tres usos potenciales para el agua almacenada en el embalse subterráneo:

- A) Abastecimiento: se podría satisfacer la demanda, con el bombeo, de una población de aproximadamente 68.000 habitantes (0,35 Hm³/mes), acumulando agua en los meses de superávit (1ª mitad del año) para ser usada en los meses de déficit. Sin embargo, este abastecimiento podría duplicarse con sólo tomar un caudal de 130 l/s del río Aller, lo cual sería medioambientalmente asumible por dicho río, pues su caudal medio es de 6,7 m³/s y su caudal ambiental se estima en 700 l/s. Para uso humano, se debería monitorizar el contenido del agua en Fe y Mn, que se encuentran por encima de los estándares de potabilidad fijados en el RD 140/2003. En principio, si se destina a la producción de agua potable, debería ser sometida a un tratamiento tipo A3 para rebajar los contenidos en ambos metales. La signatura Hidroquímica del agua es bicarbonatada sódica y de elevada dureza.
- B) La estabilidad en la temperatura de las aguas de mina de la Cuenca Central Asturiana, así como el elevado caudal disponible han demostrado que estas aguas presentan un importante potencial geotérmico que puede ser puesto en valor a mediante equipos de bomba de calor. El primer proyecto que utiliza este fluido geotérmico -para la climatización de dos edificios universitarios- prevé que el empleo del sistema geotérmico evite un 74% el consumo energético en comparación con la energía que consumiría un sistema convencional de calefacción mediante caldera de gas natural y refrigeración con equipos de aire, lo que equivale a decir que las emisiones de CO₂ se verían reducidas en un valor superior al 40%. El sistema desarrollado permite utilizar un recurso energético que hasta el momento estaba siendo desaprovechado, el agua de mina, reactivando la economía de las zonas mineras y permitiendo realizar un abandono sostenible de las labores.
- C) Aprovechamiento hidroeléctrico del agua mediante minicentral hidráulica: Se trataría de inyectar el agua de retorno (una vez utilizada para las aplicaciones de bomba de calor expuestas) a la parte superior del pozo Barredo y turbinarla en la parte inferior, aprovechando la diferencia económica resultante de produ-

cir energía en horas punta y bombearla en horas valle. Estimado salto y caudal, pudo obtenerse r la potencia instalada y la producción media, así como el balance económico, según el cual se tendrían unos ingresos de 218.731 €, imputando el coste asociado a devolver el caudal turbinado al balance económico de la bomba de calor, que existiría aunque no se produjese el aprovechamiento mediante minicentral hidráulica.

Durante la realización de este trabajo, los puntos que han presentado mayores dificultades de las que se pensaba a priori, han sido la cubicación del volumen de huecos de una forma fiable y el establecimiento del modelo térmico. Éste último continúa en desarrollo, por medio de la realización de la Tesis Doctoral de uno de los autores de este trabajo, así como otros muchos aspectos que se han tocado en este proyecto y en los que se espera profundizar en el futuro.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Abu-Hamdeh, N.H., Reeder, R.C.,. *Soil Thermal Conductivity: Effects of Density, Moisture, Salt Concentration, and Organic Matter*. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64:1285-1290
2. Arquer, F.; Meléndez M.; Nuño C.; Rodríguez M.L. *El abandono de pozos mineros en la Cuenca Carbonífera Central de Asturias: Caso de los pozos Entrego y San Mamés*. Libro de Actas de la Reunión Científico-Técnica "Gestión del agua en los procesos de cierre de minas". E.T.S. Ingenieros de Minas. Universidad de Oviedo. 2006
3. Brigaud, F. *Conductivité thermique et champ de température dans les bassins sédimentaires à partir des données de puits*. Tesis doctoral. Université des Sciences et Techniques du Languedoc. 1989.
4. Brigaud, F.; Chapman, D.S. y S. Le Douoran. *Estimating Thermal Conductivity in Sedimentary Basins Using Lithologic Data and Geophysical Well Logs*. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin.1990. Vol. 74, No. 9. p. 1459-1477.
5. Bueno, J.. Estudio Hidrogeológico de la Repercusión de la Inundación del Pozo Barredo (Mieres, Asturias). Informe Técnico para HUNOSA. AITEMIN. 2005.
6. Burke, S.P.; Potter, H.A.B.; Jarvis, A. *Groundwater rebound in the South Yorkshire Coalfield: A review of initial modelling*. Proceedings, 9th International Mine Water Congress, IMWA'05 Mine closure; Oviedo. 2005. Vol. 1, 223-227.
7. Capel Molina, J.J.. *Los climas de España*. Ed. Oikos-Tau, Barcelona. 1981. 403 pp.
8. Chapman, D.S.; Keho, T.H.; Bauer, M.S. y M.D. Picard. *Heat flow in the Uinta Basin determined from bottom hole temperature (BHT) data*. Geophysics, 57. 1984. p. 69-88.
9. Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. *Hidrología aplicada*. Ed. McGraw-Hill, 1994, 580p.

10. CIATESA. *Catálogos MT-LW-LWP (R134A y R407C)* <http://www.ciatesa.es/>
11. Cienfuegos Suárez, P. *El sector suroccidental de la Unidad Hidrogeológica 01.18 (Región del Ponga) y su relación con los sedimentos de baja permeabilidad de la Cuenca Carbonífera central Asturiana*. 2002.
12. Confederación Hidrográfica del Norte (CHN). *Propuesta del Plan Hidrológico Norte II, Documento nº 2: Normas*. 1994.
13. Control, Ingeniería y Servicios, S.A. (SEINCO). *Proyecto de Restauración Medioambiental y Recuperación de Enclaves Naturales del Río Turón*. Documento inédito. 2002.
14. Convenio de Colaboración entre HUNOSA, Universidad de Oviedo e IGME. *Estudio sobre la Inundación de los Pozos Mineros en la Zona Barredo – Valle del Turón – Valle del Aller*. Documento inédito, 2008.
15. Cordero, C., Garzón, M.B., Álvarez, C.J. Aprovechamiento geotérmico de las aguas de mina. Universidad de Oviedo: Campus geotérmico. Ponencia enviada al Congreso GEOENER 2010 y facilitada por HUNOSA, 2009.
16. Degas, M., Wojtkowiak, F., Metz, M., Branchet, M., 2003. *Stabilité de la surface après l'exploitation totale du charbon et l'arrêt des pompages d'exhaure minière*. Actas del congreso Après-mines 2003, Nancy, Francia. http://gisos.ensg.inpl-nancy.fr/UserFiles/File/PM_2003/ /Degas.pdf
17. Demongodin, L.; Pinoteau, B.; Vasseur, G. y R. Gable. *Thermal conductivity and well logs: a case study in the Paris basin*. Geophysical Journal Int. 105. 1991. p. 675-691
18. Dirección General del Agua. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. *Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitarias*. 2005
19. *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas*. 2000.
20. Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S.A., ENADIMSA. *Estudio geológico y minero de los sectores Nalón, Aller, Turón, y Riosa*. Instituto Nacional de Industria. Fondo documental de ENADIMSA. 1976.
21. Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S.A., ENADIMSA. *Inventario de Recursos Nacionales de Carbón. Asturias Zona Sur*. (Por encargo y supervisión del Centro de Estudios de la Energía. Ministerio de Industria. Centro de Documentación del IGME. Madrid, 1977.
22. Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S.A., ENADIMSA. Plan Energético Nacional. Asistencia Geológica a la Producción nacional de Carbón. *Estudio Estructural y de los Problemas Planteados en Minas de Figaredo, S.A*. Centro Documentación IGME. 1993.
23. Fandos Rodríguez, P.; Rodríguez Mateos, F.; Gutiérrez Rodríguez, A. M. y Álvarez Fernández, J. J.. *El Yacimiento de Hunosa en la Cuenca Carbonífera Central*. Servicios de Geología del caudal y del Nalón. 2004.
24. Felicísimo Pérez, A.M.. *El clima de Asturias*. Geografía de Asturias, Editorial Prensa Asturiana, S.A., Oviedo, 1992. Vol. I, p. 17-32.
25. Fernández Álvarez, J. P. *Primer inventario básico de puntos de agua del concejo de Mieres*. 2003.
26. Fernández Gutiérrez, M^a. F.. *Estudio histórico sobre el patrimonio industrial del Valle del Turón*. Consejería de Cultura del Principado de Asturias. 2004.
27. Fernández-Rubio, R.. *Clausura de minas: Impactos hidrogeológicos*. En: *El agua en el cierre de minas*; Pendás, F. y Loredó, J. (Eds.). Universidad de Oviedo. Oviedo, 2002. 288p.
28. Fernández-Rubio, R.; Fernández, S.; Esteban, J.. *Abandono de Minas. Impacto Hidrológico*. ITGE, Madrid, 1986. 267p.
29. García-Fuente, P.A. Sistema experto de predicción de desagües en minas subterráneas de carbón. Aplicación al Grupo Aller de HUNOSA. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. 1996.
30. García-Loygorri, A. *El Carbonífero en la Cuenca Central Asturiana*. Trabajos de Geología. Universidad de Oviedo. 1971. Nº 3. p. 101-150.
31. González, J.; Rebollar, A. *Interrelaciones de la minería y las aguas subterráneas en el Carbonífero de la Cuenca del Nalón (Sector Pola de Laviana-Olloniego)* IGME. 1986.
32. Gutiérrez Peinador, V., 1999. Consequences of mines closure in water circulation. Convenio de Colaboración entre HUNOSA, Universidad de Oviedo e IGME. Estudio sobre la Inundación de los Pozos Mineros en la Zona Barredo – Valle del Turón – Valle del Aller. Documento inédito, 2008.
33. Hedin, R.S.; Nairn, R.W.; Kleinmann, R.L.P. *Passive Treatment of Coal Mine Drainage*. U.S. Bureau of Mines IC 9389, 1994. 35p.
34. Horai, K.. *Thermal conductivity of rock-forming minerals*. Journal of Geophysical Research. 1971. Vol. 76. No. 5. p 1278-1308
35. HUNOSA (Comisión Técnica Minera). *Hunosa, un cambio necesario*. Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos y Facultativos de Minas de Asturias-Galicia. 1985.
36. HUNOSA. *Desagüe de los Pozos Barredo y Figaredo*. 2004.
37. IG. *Estudio Geotécnico del Edificio Científico-Técnico*. Campus de Mieres. Consejería de Educación y Ciencia del Principado de Asturias. 1998.
38. IG. *Proyecto de construcción de la Residencia de Estudiantes del Campus de Mieres*. Consejería de Educación y Ciencia del Principado de Asturias. 1999.
39. INCOSA. *Redacción del Estudio Geotécnico de las Parcelas M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11 y M12 de la actuación residencial "Vasco Mayacina" de Mieres (Asturias)*. 2007.
40. Ingeniería y Medioambiente S.A. (INMASA). *Estudio de inundabilidad de determinados ámbitos del plan territorial especial de recuperación de los terrenos de HUNOSA en las cuencas mineras*. Documento inédito. 2007.
41. Instituto Geológico y Minero de España (IGME). *Actualización del Inventario de Recursos Nacionales de Car-*

- bón. Zona Asturias II-Cuenca Central*. Ministerio de Industria y Energía; Secretaría de la Energía y Recursos Minerales. Madrid. 1982-1984.
42. Instituto Geológico y Minero de España, IGME. *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. 1984.
 43. Instituto Geológico y Minero de España, IGME. Mapa Geológico de España. *MAGNA, Hoja 53. Memoria*. Ministerio de Educación y Ciencia. Madrid. 1975.
 44. Instituto Geológico y Minero de España, IGME. Mapa Geológico de España. *MAGNA, Hoja 53. Planos*. Ministerio de Educación y Ciencia. Madrid. 1975.
 45. Investigación y Control de Calidad, S. A. *Realización de Estudio Geotécnico de las parcelas M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11, Y M12 de la Actuación Residencial "Vasco Mayacina" de Mieres (Asturias)*. SEPES. 2007.
 46. INYTRAM. *Proyecto de ejecución para Centro de Investigación. Estudio Geotécnico. Campus Universitario Pozo Barredo. Mieres*. 2006.
 47. ITGE (Instituto Tecnológico y Minero de España). *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. 1995.
 48. Jardón, S. *Aprovechamiento de las Aguas de Mina en la Cuenca Central Asturiana como Recurso Energético*. Memoria de Investigación. 2008
 49. Jarvis, A.P.; Younger, P.L.. *Dominating chemical factors in mine water induced impoverishment of the invertebrate fauna of two streams in the Durham Coalfield, UK*. Chemistry and Ecology, 1997. Vol. 13, 249-270.
 50. Kappelmeyer, O. y R. Haenel. *Geothermics with special reference to application*. Geoexploration Monograph Series 1, 1974. No 4.
 51. Kleinmann, R.L.P.. *Treatment of Acidic Mine Water by Wetlands*. U.S. Bureau of Mines IC 9027. 1985. Vol. 1, 48-52.
 52. Kleinmann, R.L.P.; Crerar, D.A.; Pacelli, R.R.. *Biochemistry of Acid Mine Drainage and a Method to Control Acid Formation*. Mining Engineering. 1981. Vol. 33, 300-306.
 53. Kleinmann, R.L.P.; Jones, J.R.; Erickson, P.M. *An Assessment of the Coal Mine Drainage Problem*. Proceedings of the 10th Annual Conference of the Association of Abandoned Mine Land Programs (Wilkes-Barre, PA). 1988. Vol. 1, 1-9.
 54. López, C.; Torres, M.; Gutiérrez, M. *Los movimientos del terreno en las laderas del valle del río Caudal y la incidencia de las escombreras del carbón en los mismos*. Departamento de Geología, Universidad de Oviedo. Trabajos de Geología, Univ. de Oviedo, 2002. nº 23, p.35-52
 55. Maldonado Zamora, A. *Testificación geofísica en sondeos de captación de agua*. Aguas subterráneas y abastecimiento urbano. ITGE, 2009. http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/pdfart1/maldonado.pdf
 56. Marquínez, J.; Lastra, J.; García, P.. Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis. *Journal of Hydrology*, 2003. Vol. 270, p. 1-11.
 57. Martínez Alfaro, P.E., Martínez Santos, P., Castaño Castaño, S. *Fundamentos de Hidrogeología*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 2006.
 58. Menéndez, R., Lastra, J., Fernández, E., Marquínez, J., Wozniak, E. *Riesgos naturales en Asturias*. KRK Ediciones. 2003.
 59. Midttome, K. y E. Roaldset. *Thermal conductivity of sedimentary rocks: uncertainties in measurement and modelling*. Geological Society, London.1999. 158. p. 45-60.
 60. Midttomme, K.; Roaldset, E. y P. Aagaar. *Thermal conductivities of argillaceous sediments*. Geological Society Engineering. 1997. No. 12. p. 355-363.
 61. Ministerio de Fomento. *Mapa para el cálculo de máximas precipitaciones diarias en la España peninsular*. Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes. Dirección General de Carreteras. 1997.
 62. Ministerio de Medio Ambiente-Confederación Hidrográfica del Norte. *Instrucción de Planificación Hidrológica*, borrador versión 11.22, de Febrero 2008
 63. Ministerio de Medio Ambiente-Confederación Hidrológica del Norte. *Norma 2.1.2.12.- Caudales mínimos medioambientales del Plan Hidrológico Norte I*. 1997.
 64. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (M.O.P.U.), 1990. *Instrucción de carreteras 5.2-IC "Drenaje superficial"*. BOE 123, 23-5-1990.
 65. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU). *Documentación básica Plan Hidrológico II*; Confederación Hidrográfica del norte. Dirección General de Obras Hidráulicas. 1988.
 66. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. *Cuenca del Norte de España: Inundaciones históricas y mapa de riesgos potenciales*. Dirección General de Obras Hidráulicas. 1985.
 67. Negrodo, A.M., Fernández, M. y M.J. Jurado. *Determinación del flujo de calor a partir de sondeos petroleros en la Cuenca Catalano-Balear*. Acta Geológica Hispánica, 1996. Vol. 29, No 1. p. 27-40.
 68. Nuttal, C.A., Younger, P.L., 2004. Hydrochemical stratification in flooded underground mines: an overlooked pitfall. *Journal of Contaminant Hydrology*, 69: 101-114.
 69. Parkin, G.; Birkinshaw, S.J.; Younger, P.L.; Rao, Z.; Kirk, S.. *A numerical modelling and neural network approach to estimate the impact of groundwater abstractions on river flows*. *Journal of Hydrology*, 2007. Vol. 339 (1-2), 15-28.
 70. Pendás Fernández, F.; Loredó Pérez, J.. *El agua en los procesos de cierre de minas en Asturias. Proceedings de la Reunión Científico-Técnica "Gestión del agua en los procesos de cierre de minas"*. E.T.S. Ingenieros de Minas. Universidad de Oviedo. 2006.
 71. Pendás, F.; Loredó, J.; Ordóñez, A.. *Exploración, evaluación y explotación de metano en capas de carbón*. Ed. Instituto Geológico y Minero de España, 2002. Vol. 1, 224 p.

72. PIRAMID Consortium. *Engineering Guidelines for the Passive Remediation of Acidic and/or Metalliferous Mine Drainage and Similar Wastewaters*. Report European Commission 5th Framework RTD Project No. EVK1-CT-1999-000021. University of Newcastle, Newcastle Upon Tyne UK. 2003. 166p.
73. Proust, A., 1964. *Etude sur les affaissements miniers dans le bassin du Nord et du Pas-de-Calais*. Revue de l'Industrie Minière, Juin-juillet 1964, Vol. 46, nos 6 y 7.
74. Rambaud, P., Del Olmo, A., Pernia, L., Ramírez, O., Celada, B., Campos. *Hundimientos Mineros*. Instituto Geológico y Minero de España. 1986.
75. *Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano*. 2003.
76. Renz, A.; Rühaak, W.; Schätzl, P. y H.J.G. Diersch. *Numerical modeling of geothermal use of mine water: challenges and examples*. Mine Water Environment, 2009. 28. p. 2-14
77. Revilla, J.A. (Universidad de Cantabria). *Estudio de caudales ecológicos en la red hidrográfica de Cantabria*. Oficina de planificación Hidrológica de Cantabria. 2007.
78. Rogoz, M. *Water capacity of abandoned working in underground coal mines*. Libro de Actas de la Conferencia Internacional: Water in Mining and Underground Works. SIAMOS, Granada (Spain). 1978.
79. Rushton, K.R. *Groundwater Hydrology: Conceptual and Computational Models*, Wiley, Chichester. 2003
80. Sánchez, F.J. *Distribuciones estadísticas*. Universidad de Salamanca, 2008, 12p. (En: <http://web.usal.es/javisan/hidro>)
81. Sánchez, F.J. *Hidrología Superficial: Relaciones Precipitación-Escurrentía*. Universidad de Salamanca, 2008, 17p. (En: <http://web.usal.es/javisan/hidro>)
82. Serra, O. *Diagraphies différees, bases d'interprétation, acquisition des données diagraphiques*. Bull. Cent. Reach. Exp. Prod. Mem. I. Elf. Aquitaine. 1979.
83. Singer, P.C.; Stumm, W.. *Acidic Mine Drainage: the Rate Determining Step*. *Science*. 1970. Vol.167, 1,121-1,123.
84. Vera, J.A.. *Geología de España*. SGE-IGME. 2004. 884 pp.
85. Watzlaf G.R y T.E. Ackam. *Flooded Underground Coal Mines: A Significant Source of Inexpensive Geothermal Energy*. National Energy Technology Laboratory (NETL), Pittsburgh, PA, and Morgantown, WV. 2006.
86. Watzlaf, G.; Schroeder, K.; Kleinmann, R.; Kairies, C.; Nairn, R.. *The Passive Treatment of Coal Mine Drainage*. DOE/NETL-2004/1202. Springfield, Va.: National Technical Information Service. 2004. 72p.
87. Wildeman T. R.; Spotts, E.; Schafer, W.; Gusek, J.. *Characterization, Management and Treatment of Water for Metal-Mining Operations*. Short Course at the 1994 Meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation (Pittsburgh, PA). 1994.
88. Willie, M.R.J., Gregory, A.R. y G.H.F. Gardne. *Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media*. Geophysys, 1956. 21. p. 41-70.
89. Winter, T.C.; Harvey, J.W.; Franke, O.L.; Alley, W.M.. *Ground water and surface water –a single resource*. US Geol. Survey Circular. 1998. 1139. 79pp.
90. Younger, P.L.. *Coalfield abandonment: Geochemical processes and Hydrochemical products*. En: Nicholson, K., Energy and the Environment. Geochemistry of fossil, nuclear and renewable resources. Society for Environmental Geochemistry and Health. McGregor Science, Aberdeenshire, 1998. p. 1-29.
91. Younger, P.L.. *Minewater pollution: The revenge of Old King Coal*. *Geoscientist*, 1994, Vol. 4 (5), p. 6-8.
92. Younger, P.L.. *The longevity of minewater pollution: A basis for decision-making*. *Science of the Total environment*, 1997. Vol. 194/195, p. 457-466.
93. Younger, P.L.; Banwart, S.A.; Hedin, R.S.. *Mine Water. Hydrology, Pollution, Remediation*. Kluwer Ac. Publ. Reino Unido, 2002. 442p.
94. Younger, P.L.; Mackay, R.; Connorton, B.J.. *Streambed sediment as a barrier to groundwater pollution: insights from fieldwork and modelling in the River Thames basin*, *Journal of the Institution of Water and Environment Management*, 1993. Vol. 7, p. 577-585.

8. ANEXO I: TABLA PARA ESTIMACIÓN DEL UMBRAL DE ESCORRENTÍA

(modificada de la del U. S. Soil Conservation Service, citado en Chow et al., 1994)

Uso de la tierra	Pendiente %	Características hidrológicas	Grupo de suelo			
			A	B	C	D
Praderas	≥ 3	Pobre	24	14	8	6
		Media	53	23	14	9
		Buena	--	33	18	13
		Muy buena	--	41	22	15
	< 3	Pobre	58	23	12	7
		Media	--	35	17	10
		Buena	--	--	22	14
		Muy buena	--	--	25	18

NOTAS:

- Los valores de P_0 notablemente altos se han sustituido en la tabla por unos guiones. Las superficies de cuenca a que correspondan esos valores deben considerarse inexistentes a efectos del cálculo de avenidas pues con los períodos de retorno habituales no cabe esperar que provoquen escurrentía.
- Las zonas abancaladas se incluyen entre aquellas de pendiente menor que el 3%.
- Los núcleos urbanos, edificaciones rurales, caminos, etc., no se tendrán en cuenta al representar un porcentaje despreciable del área total. En caso contrario, deberán diferenciarse los porcentajes de las superficies impermeables ($P_0 \gg 0$) y de los distintos tipos de suelo, atribuyendo a cada uno el valor correspondiente de P_0 según la tabla.

Los conceptos que aparecen en la tabla anterior se definen a continuación:

Praderas, prados y pastizales

Se agrupan en esta categoría el conjunto de cultivos cuyo aprovechamiento constituye la base de la alimentación del ganado. A su vez se clasifican en:

- Pobres: Bajo un intenso régimen de pastoreo o con cobertura vegetal en menos del 50% de la superficie, como son los pastizales y los eriales.
- Medias: Bajo un moderado régimen de pastoreo o con cobertura vegetal en un porcentaje de la superficie total comprendido entre el 50 y el 75%.
- Buenas: Bajo un pastoreo ligero o con cobertura vegetal en más del 75% de la superficie total.
- Muy buenas: Se consideran dentro de este grupo las praderas artificiales, las praderas naturales mixtas y los prados naturales, cuando no están explotados en régimen de pastoreo. La vegetación es densa, abundante, homogénea y de cierta altura.

Suelos

- Grupo A: En ellos el agua se infiltra rápidamente aún cuando están muy húmedos. Profundos y de texturas gruesas (arenosas o areno-limosas), están excesivamente drenados.
- Grupo B: Cuando están muy húmedos tienen una capacidad de infiltración moderada. La profundidad de suelo es de media a profunda, y su textura franco-arenosa, franca, franco-arcillo-arenosa o franco-limosa según terminología del U.S. Department of Agriculture. Están bien o moderadamente drenados.
- Grupo C: Cuando está muy húmedos la infiltración es lenta. La profundidad de suelo es inferior a la media y su textura es franco-arcillosa, franco-arcillo-limosa, limosa o arcillo-arenosa. Son suelos imperfectamente drenados.
- Grupo D: Cuando están muy húmedos la infiltración es muy lenta. Tienen horizontes de arcilla en la superficie o próximos a ella y están pobremente o muy pobremente drenados. También se incluyen aquí los terrenos con nivel freático permanentemente alto y suelos de poco espesor (litosuelos).

9. INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Ubicación de los pozos de HUNOSA respecto a núcleos de población	7
Figura 2.	División del Macizo Ibérico (Vera et al, 2004)	9
Figura 3.	La Cuenca Carbonífera Central: Unidades y delimitación del paquete improductivo (González y Rebollar, 1986)	10
Figura 4.	Mapa Geológico de la CCC a cota -100 m. (ENADIMSA, 1976), con la zona de estudio enmarcada	11
Figura 5.	Principales estructuras de la CCC (IGME, 1975), con la zona de estudio enmarcada	12
Figura 6.	Sistemas acuíferos de Asturias con la ubicación de la CCC (IGME, 1984)	13
Figura 7.	Esquema de funcionamiento hidrodinámico (González y Rebollar, 1986)	14
Figura 8.	Esquema de labores mineras de extracción de carbón en la CCC	15
Figura 9.	Esquema teórico del drenaje en una explotación de montaña (González y Rebollar, 1986)	16
Figura 10.	Esquema teórico del drenaje de un pozo minero (González y Rebollar, 1986)	16
Figura 11.	Pluviometría-desagüe en el Pozo San Mamés	17
Figura 12.	Mapa de situación de los pozos mineros	18
Figura 13.	Esquema de labores en planta y estructura de la CCC	18
Figura 14.	Vista del Pozo Barredo	19
Figura 15.	Esquema en planta de las labores del Pozo Barredo	19
Figura 16.	Esquema de las labores en perfil del Pozo Barredo	20
Figura 17.	Vista del Pozo Figaredo	21
Figura 18.	Esquema de las labores en perfil del Pozo Figaredo	21
Figura 19.	Esquema de las labores en planta del Pozo Figaredo	21
Figura 20.	Vista del Pozo San José	22
Figura 21.	Vista del Pozo Santa Bárbara	22
Figura 22.	Conexiones entre los Pozos Barredo, Figaredo y San José	24
Figura 23.	Conexiones entre los Pozos Santiago, Santa Bárbara y San José	24
Figura 24.	Leyenda de la geología de la zona	25
Figura 25.	Planos de labores de los Pozos Barredo y Figaredo sobre el mapa geológico de superficie (Basado en IGME, 1984)	25
Figura 26.	Cortes geológicos B-B' y C-C'	26
Figura 27.	Corte B-B'	27
Figura 28.	Corte C-C'	27
Figura 29.	Correlación de las columnas estratigráficas de los pozos Barredo y Figaredo	28
Figura 30.	Área total considerada para la petición de datos climáticos al INM	29
Figura 31.	Estaciones consideradas en el estudio climático	31
Figura 32.	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	32
Figura 33.	Valores medios y máximos mensuales de precipitación en 24 horas en la zona de estudio	33
Figura 34.	Histograma de frecuencias de precipitaciones de intensidad superior a 40mm/24h	34
Figura 35.	Intensidad máxima horaria de cada día del periodo de registro de dicha variable en la Estación de Sta. Cruz de Mieres	35
Figura 36.	Precipitación a lo largo de las 24 horas de los días de mayor intensidad de precipitación en la Estación de Sta. Cruz de Mieres durante el periodo 2003-2008	35
Figura 37.	Esquema del método de inyección instantánea	37
Figura 38.	a) Aforo con molinete; b) Detalle del molinete; c) Ejemplo para el cálculo del caudal a partir del trazado de la sección del cauce del río y la determinación de la velocidad media para la misma	38
Figura 39.	Subcuencas en las que se ha dividido la zona de estudio	39
Figura 40.	Mapa de situación de las secciones de aforo	39
Figura 41.	Relación entre el caudal desaguado mensualmente en las explotaciones mineras de la zona de estudio y la precipitación media mensual (barras de color azul) entre Enero de 1999 y Diciembre de 2004 (Bueno, 2005)	41
Figura 42.	Embalse minero del conjunto Barredo-Figaredo	42
Figura 43.	Planes de labores; se consultaron 23 de Barredo y 36 de Figaredo.	43
Figura 44.	Coeficiente de capacidad de agua en función de la profundidad y el método de explotación (Rogoz, 1978)	43
Figura 45.	Comparación entre los valores mensuales de precipitación y bombeo para el año hidrológico de 2006-2007	51
Figura 46.	Esquema de la bomba de calor (Heat Pump Centre)	53

Figura 47.	Evolución costes calefacción en \$/GJ	54
Figura 48.	Esquema del salto de agua para el Pozo Barredo (cotas en m.s.n.m.)	55
Figura 49.	Isoyetas medias anuales (periodo 1970/71-2007/08)	56
Figura 50.	Isoyetas del año seco (periodo 1970/71-2007/08)	56
Figura 51.	Isoyetas del año húmedo (periodo 1970/71 – 2007/08)	57
Figura 52.	Isotermas medias anuales (periodo 1970/71 – 2007/08)	57
Figura 53.	Evapotranspiración potencial anual (periodo 1970/71 – 2007/08)	57
Figura 54.	Evapotranspiración real anual (periodo 1970/71 – 2007/08)	58
Figura 55.	Isoyetas de precipitación útil anual (periodo 1970/71 – 2007/08)	58
Figura 56.	Variación de precipitación, temperatura y evapotranspiración real a lo largo de un año hidrológico medio en la zona de estudio	59
Figura 57.	Caudales específicos de avenidas en función de la cuenca afluyente y del período de retorno T.	61
Figura 58.	Escalas limnimétricas colocadas en las secciones de aforo del río Turón; de izda. a dcha.: La Granxa, La Veguina y Peñule	63
Figura 59.	Curvas de gastos para las secciones de aforo de la Granxa, La Veguina y Peñule	64
Figura 60.	Hidrogramas en las secciones de aforo de la Granxa, La Veguina y Peñule	64
Figura 61.	Representación conjunta de los hidrogramas de las tres secciones de aforo	65
Figura 62.	Caudal bombeado recientemente en el Pozo San José que es incorporado al río Turón	65
Figura 63.	Varación de la conductividad eléctrica del río Turón en los tres puntos de aforo	65
Figura 64.	Relación entre precipitación y escorrentía; Obtención del coeficiente de escorrentía mensual de la cuenca	66
Figura 65.	Correlación entre los caudales específicos de los ríos Aller y Turón	66
Figura 66.	Estimación para un año hidrológico del caudal medio, ambiental y mínimo del río Turón	67
Figura 67.	Mapa de puntos de agua	70
Figura 68.	Variación temporal del volumen de llenado de los huecos durante la inundación y el de agua infiltrada al interior de los mismos	73
Figura 69.	Volumen de huecos estimados a cada cota en Barredo	73
Figura 70.	Volumen de huecos estimados a cada cota en Figaredo	73
Figura 71.	Volumen de huecos estimados a cada cota en el embalse conjunto Barredo-Figaredo	73
Figura 72.	Volumen acumulado de huecos del embalse minero Barredo-Figaredo	74
Figura 73.	Canal de vertido general Pozo Barredo (10-07-2007)	74
Figura 74.	Esquema del sistema de bombeo del Pozo Barredo.	75
Figura 75.	Representación de los caudales desaguados por el pozo Barredo durante el periodo 2002-2007.	76
Figura 76.	Representación de los caudales desaguados por el pozo Figaredo durante el período 2002-2007.	77
Figura 77.	Relación entre lluvia útil diaria y días de máximo bombeo en los pozos San Vicente y San Inocencio de Figaredo, en el año 1992	77
Figura 78.	Relación entre lluvia útil diaria y bombeo diario en el pozo Barredo, mostrando un retardo medio de 19 días	78
Figura 79.	Relación entre la lluvia útil mensual y la infiltración al interior del embalse minero Barredo-Figaredo	79
Figura 80.	Relación entre la infiltración calculada a partir de la lluvia útil diaria y la infiltración real (equiparable al bombeo) en el embalse minero Barredo-Figaredo	79
Figura 81.	Mapa hidrogeológico del entorno de los pozos Barredo-Figaredo	80
Figura 82.	Medidor de hidronivel marca Seba	81
Figura 83.	Evolución de la cota absoluta del agua medida en la caña de los pozos durante la fase de inundación	83
Figura 84.	Evolución de la cota absoluta del agua, medida en la caña de los pozos Barredo (+220 m.s.n.m) y Figaredo (San Inocencio) (+253,70 m.s.n.m.)	83
Figura 85.	Evolución temporal de los niveles de inundación en los pozos Barredo y Figaredo en relación a los huecos estimados	84
Figura 86.	Evolución de la cota absoluta del agua en los pozos San José y Santa Bárbara comparados con el bombeo en el Pozo Santa Bárbara, en el periodo 2007-2008	84
Figura 87.	Evolución de la cota absoluta del agua, medida en la caña de los pozos San José (+294 m.s.n.m.) y Santa Bárbara (+334 m.s.n.m.)	85
Figura 88.	Nivel del agua y temperatura en los cuatro pozos del Turón a fecha 23-11-09, obtenidos a partir del programa de monitorización en continuo, establecido por HUNOSA	85
Figura 89.	Diagramas de Stiff correspondientes al agua de Barredo en época seca (izda.) y de lluvias (dcha.) (Cordero et al., 2009)	89
Figura 90.	Perfiles de varios parámetros registrados con la sonda Aqua Troll a lo largo de la caña del pozo Barredo	90

Figura 91.	Evolución de la temperatura en la caña de los pozos	90
Figura 92.	Perfiles térmicos Pozo Barredo	90
Figura 93.	Perfil térmico del Pozo Barredo. Se observa la tendencia de la temperatura media, así como los intervalos entre los que se ha movido la temperatura para cada cota	91
Figura 94.	Columna estratigráfica del Pozo barredo	91
Figura 95.	Ubicación y descripción de las muestras tomadas y estudiadas	118
Figura 96.	Relación entre contenido en materia orgánica y reducción de la conductividad térmica, según Abu-Hamdeh y Reeder (2000)	123
Figura 97.	Mapa geológico en el que se indica el corte A-A' por el pozo Barredo (siguiente figura)	126
Figura 98.	Corte A-A' por el pozo Barredo, indicando las conductividades térmicas calculadas para los distintos materiales geológicos	127
Figura 99.	Modelo conceptual simplificado de balance hídrico en la zona de estudio para un periodo anual durante la fase de bombeo	128
Figura 100.	Modelo conceptual simplificado de balance hídrico en la zona de estudio para un periodo anual tras la interrupción del bombeo	128
Figura 101.	Gráfica de aportaciones acumuladas	128
Figura 102.	Gráfica caudales clasificados-demanda	128
Figura 103.	Caudal medio y ambiental del río Aller, a la altura de Moreda	129
Figura 104.	Sistema de bombeo instalado en el pozo Barredo (cortesía de HUNOSA)	134
Figura 105.	Esquema del sistema de distribución (cortesía de HUNOSA)	134
Figura 106.	Esquema de funcionamiento sistema geotérmico a cuatro tubos Centro de Investigación (cortesía de HUNOSA)	135

10. INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Variación de los valores hidráulicos del acuífero por la acción de las labores mineras	18
Tabla 2.	Estaciones pluviométricas y termopluviométricas incluidas en el área seleccionada para la petición de datos climáticos. Estos no fueron facilitados en el caso de las estaciones sombreadas	30
Tabla 3.	Características y periodo de funcionamiento considerado para las estaciones utilizadas en el estudio climático	31
Tabla 4.	Máximos valores anuales de precipitación en 24 h registrados en Sta. Cruz de Mieres	34
Tabla 5.	Intensidad máxima de precipitación para distintos periodos de retorno, según el método de ajuste de Gumbel	36
Tabla 6.	Intensidad máxima de precipitación para distintos periodos de retorno según el método de las isolíneas	36
Tabla 7.	Coordenadas de las secciones de aforo del río Turón	37
Tabla 8.	Volumen desaguado de los pozos de los valles de los ríos Caudal y Turón (Bueno, 2005)	41
Tabla 9.	Densidades para diferentes componentes de la matriz	48
Tabla 10.	Conductividades térmicas de minerales sedimentarios y de algunos fluidos	49
Tabla 11.	Valores climatológicos para un año hidrológico medio en la zona de estudio	59
Tabla 12.	Caudal de máxima avenida para distintos periodos de retorno, según el Método Racional	60
Tabla 13.	Caudal de máxima avenida para distintos periodos de retorno, según la fórmula de Témez	60
Tabla 14.	Caudal de máxima avenida para distintos periodos de retorno, según la fórmula de Zapata	60
Tabla 15.	Caudal de máxima avenida para varios periodos de retorno, según el Método del PHN II	61
Tabla 16.	Resumen de caudales de máxima avenida obtenidos por diversos métodos para varios periodos de retorno y valores medios	61
Tabla 17.	Resultados de los aforos y mediciones de parámetros in situ realizados en el río Turón en el punto de aforo 1 (se incluyen datos históricos, además de los que se están recogiendo actualmente)	62
Tabla 18.	Resultados de los aforos y mediciones de parámetros in situ realizados en el río Turón en el punto de aforo 2 (se incluyen datos históricos, además de los que se están recogiendo actualmente)	62
Tabla 19.	Resultados de los aforos y mediciones de parámetros in situ realizados en el río Turón en el punto de aforo 3 (se incluyen datos históricos, además de los que se están recogiendo actualmente)	63
Tabla 20.	Puntos de agua inventariados	67
Tabla 21.	Toneladas de carbón extraídas por relleno y hundimiento en el Pozo Barredo	70
Tabla 22.	Toneladas de carbón extraídas por relleno y hundimiento en el Pozo Figaredo	70
Tabla 23.	Longitud de galerías abiertas en los pozos Barredo-Figaredo.	71
Tabla 24.	Cálculos para estimación de volúmenes de huecos de Barredo	71
Tabla 25.	Cálculos para estimación de volúmenes de huecos de Figaredo	72
Tabla 26.	Volúmenes desaguados (m ³) en el año 2007 en los pozos del Grupo HUNOSA en el valle del Turón	74
Tabla 27.	Volúmenes mensuales y anuales desaguados, en m ³ , del pozo Barredo durante el período 2002-2007	76
Tabla 28.	Volúmenes mensuales y anuales desaguados, en m ³ , del pozo Figaredo durante el período 2002-2007	77
Tabla 29.	Datos de bombeo máximo diario en el pozo Figaredo y cálculo de periodos de retardo de la infiltración en cada caso	78
Tabla 30.	Características hidrogeológicas de las formaciones permeables existentes	80
Tabla 31.	Cota absoluta del nivel del agua, medida en la caña de los pozos. Entre paréntesis figura la cota (m.s.n.m.) del brocal de cada pozo (* Cese de bombeo en el Pozo Santa Bárbara; ** Reactivación del bombeo en el Pozo Santa Bárbara)	81
Tabla 32.	Medición de parámetros in situ en el agua de los pozos del Turón, a nivel superficial	86
Tabla 33.	Análisis de aguas bombeadas del Pozo Barredo (Unidad Medio Ambiente-HUNOSA).	87
Tabla 34.	Análisis de aguas bombeadas del Pozo Figaredo (Unidad Medio Ambiente-HUNOSA)	87
Tabla 35.	Análisis de las aguas del Pozo Barredo	87
Tabla 36.	Análisis de las aguas del Pozo Figaredo	88
Tabla 37.	Parámetros y valores paramétricos según el R.D.140/2003	88
Tabla 38.	Descripción detallada de la columna estratigráfica de Barredo	119
Tabla 39.	Cálculo de la densidad de las muestras	121
Tabla 40.	Cálculo de la densidad media de la matriz	122
Tabla 41.	Determinación de la porosidad de las muestras	122
Tabla 42.	Conductividad térmica de los principales componentes de las muestras	123
Tabla 43.	Cálculo de la conductividad térmica de cada una de las muestras estudiadas	123
Tabla 44.	Caudales evacuados por los pozos ubicados en la zona de estudio en el periodo 2002-2007	127
Tabla 45.	Variación del embalse subterráneo a lo largo de un año tipo suponiendo el embalse vacío al principio del año	129

Tabla 46.	Variación del embalse subterráneo a lo largo de un año tipo suponiendo el embalse lleno al principio del año	129
Tabla 47.	Relación de empresas del Polígono Industrial de Gonzalín e información recopilada	130
Tabla 48.	Relación de empresas del Polígono Industrial de Vega de Arriba e información recopilada	130
Tabla 49.	Relación de empresas del Polígono Industrial de La Cuadriella e información recopilada	131
Tabla 50.	Relación de empresas del Polígono Industrial de Senriella y Sovilla e información recopilada	131
Tabla 51.	Relación de centros de educación ubicados en el Término Municipal de Mieres	132
Tabla 52.	Consumo energético anual del sistema geotérmico y sistema convencional (Cortesía de HUNOSA)	136

Agradecimientos

En primer lugar, es a la Fundación Mapfre a quien debemos nuestra gratitud, ya que sin su auspicio en la forma de Ayuda a la Investigación, Área de Medio ambiente, muchos de los trabajos que aquí se exponen no hubiesen podido llevarse a cabo. La colaboración de la Empresa HUNOSA, y en particular, el Departamento de Nuevos Desarrollos, ha sido fundamental, tanto en la aportación de información (de la cual se nutre este informe), como en la colaboración personal. También debemos agradecer al Departamento de Explotación y Prospección de Minas de la Universidad de Oviedo, en cuyo seno se ha desarrollado nuestro trabajo, por su apoyo técnico y material.

Debemos mencionar aquí a las personas de la Dirección General de Industria y Energía, el Archivo Histórico de HUNOSA (pozo Fondón) y el Archivo Histórico de Oviedo por su ayuda en nuestra búsqueda de información, así como otros expertos como P. Younger (Universidad de Newcastle), A. Germán González (Cáma Oficial Minera de Asturias), Benjamín Celada (Geocontrol) y Javier Toraño (Universidad de Oviedo), por facilitarnos información y asesoramiento de modo desinteresado. Finalmente, cómo no mencionar a Cecilia, Aurelio y Eladio, nuestros colaboradores de Turón, que diariamente recogen las alturas limnimétricas del río, así como a todas aquellas personas que nos ha ayudado en este trabajo.

