

Aprovechamiento de las **AGUAS SUBTERRÁNEAS** *como recurso hídrico y energético*

En el presente trabajo se evalúan 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. Para ello se ha escogido un «embalse subterráneo» configurado por las labores conectadas de los pozos Barredo y Figaredo y se ha realizado un detallado estudio climático, hidrológico e hidrogeológico, hidroquímico y de conductividades térmicas, cuantificando los potenciales aprovechamientos. Se pretende contribuir así a la mejora de las condiciones económicas y sociales de un área tradicionalmente minera y en progresivo declive debido al cese de tal actividad.

Por **A. ORDÓÑEZ**. Dr. ingeniero de Minas, profesor titular de la Universidad de Oviedo (aoalonso@uniovi.es).

C. ANDRES. Ingeniero de Minas, alumno de doctorado. **R. ÁLVAREZ**. Dr. ingeniero de Minas, profesor titular de la Universidad de Oviedo. **S. JARDÓN**. Ingeniero de Minas, alumno de doctorado.

La larga historia de la minería del carbón en Asturias ha provocado una fuerte alteración en los niveles potenciométricos y en el flujo natural de los acuíferos preexistentes en las áreas afectadas. Las explotaciones se puede considerar que han dado lugar a un acuífero de triple porosidad⁽¹⁾; donde antes había pequeños acuíferos en

areniscas, dentro de un sistema multicapa de pequeña entidad, ahora se han generado galerías mineras y zonas fracturadas que funcionan como acuíferos asimilables a los kársticos⁽²⁾. De hecho, el conjunto de los huecos provocados por la minería del carbón en la cuenca central asturiana funciona como un gran embalse subterráneo.





Castillete en el pozo Figaredo.

El aprovechamiento del agua de mina como recurso hasta ahora desaprovechado puede reactivar la economía de las zonas mineras, permitiendo realizar un abandono sostenible de las labores mineras



Vista de las instalaciones del pozo Barredo, en el término de Mieres.

En la actualidad, el bombeo de las aguas infiltradas supone una importante carga económica 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 a las interconexiones creadas tras cientos de años de minería. Dada la proximidad de los pozos a núcleos de población de la Cuenca Carbonífera Central, las características físico-químicas de las aguas y el creciente aumento de costes de calefacción y refrigeración convencionales, 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 energía mediante el uso de redes calóricas con bombas de calor–.

Localización y caracterización del área de estudio

El área de estudio está localizada en el sector central del Principado 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 y Figaredo (conectados entre sí), San José y Santa Bárbara (también conectados). El área abarca el sur del término municipal de Mieres, el sector noroccidental del término municipal de Aller y una pequeña parte del

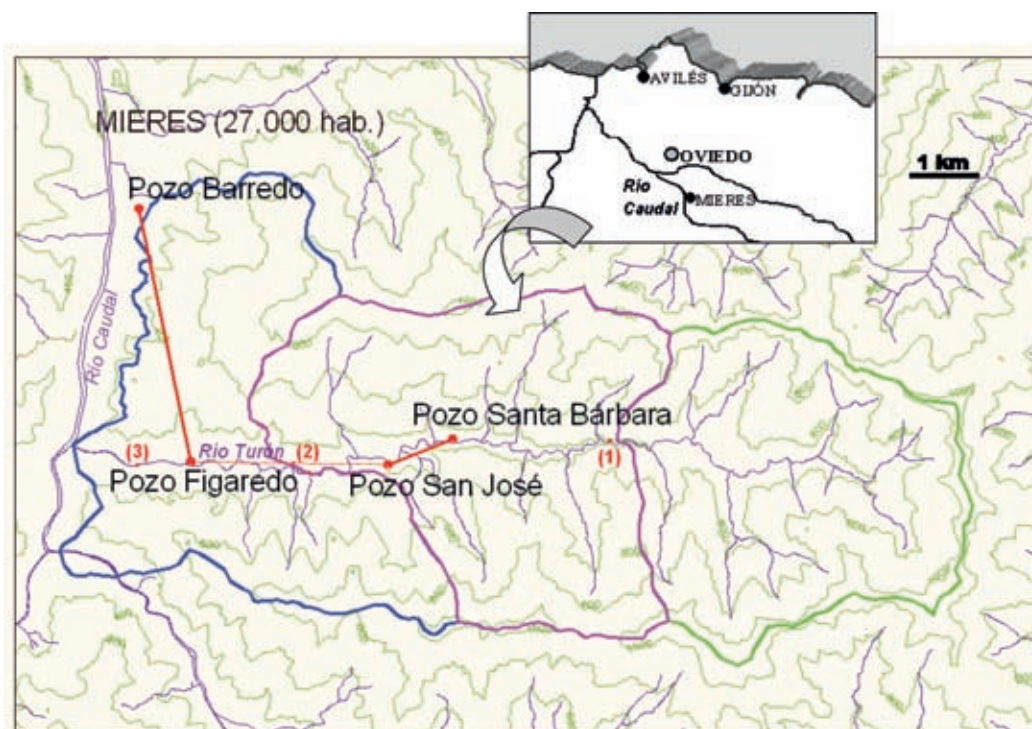


Figura 1. Ubicación de los pozos mineros del valle del río Turón y principales conexiones entre ellos (en rojo). División en subcuencas para el estudio hidrológico y puntos de aforo: (1) La Granxa, (2) La Veguina, (3) Peñule.

sector nororiental del término municipal de Lena. La superficie de terreno comprendido entre sus límites supone un área aproximada de 140 km² (fig. 1).

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 este-oeste, desembocando en el río Caudal a la altura de la localidad de Figaredo y de la llanura aluvial del río Caudal, que, a su paso por la localidad de Mieres, incluye la zona de influencia del pozo Barredo.

Desde un punto de vista geológico, las rocas que configuran el subsuelo –a excepción de formaciones superficiales cuaternarias de reducido espesor– son de edad Carbonífero Westfaliense, habiéndose formado inmediatamente antes o simultáneamente al desarrollo de la orogenia hercínica (es decir, son secuencias pre- y sinorogénicas). La rela-

ción de simultaneidad entre actividad tectónica y sedimentación hace que las sucesiones carboníferas sean más complejas que las anteriores, mostrando una acusada variabilidad lateral y vertical de facies y frecuentes cambios de espesor. En líneas generales, las sucesiones carboníferas están formadas por sedimentos siliciclásticos, aunque los carbonatos alcanzan localmente gran desarrollo, y fueron depositados en ambientes desde marinos profundos a marinos someros, y finalmente a costeros y continentales con capas de carbón. Estos depósitos se organizan en secuencias de somerización de gran escala, de centenares a miles de metros de espesor.

En relación a la actividad orogénica, el registro sedimentario carbonífero de la zona cantábrica puede dividirse en tres grandes conjuntos, aunque en el marco del presente trabajo solamente se cita el intermedio (Namuriense-Westfaliense D Superior). En este conjunto se distinguen a su vez dos intervalos: uno inferior, predominantemente calcáreo (Fms. Barcaliente y Valdeteja) y sin influencia en la zona de estudio, y otro superior, de características claramente sinorogénicas, y que se describe un poco

La infiltración que recarga el embalse constituido por las labores de los pozos Barredo y Figaredo es un 20-23% de la lluvia útil, junto con un aporte constante procedente de la escorrentía (río), que se infiltra a través de las zonas fracturadas

más en detalle, según lo conocido en el sector Aller-Nalón.

La sucesión en el sector Aller-Nalón se divide en los grupos Lena y Sama, cuyo límite se sitúa en el Westfaliense D. Ambos grupos se subdividen en unidades o «paquetes» de origen minero⁽³⁾ que corresponden a la distribución de las capas de carbón.

El Grupo Lena (~3.350 m) consta predominantemente de depósitos marinos formados por alternancias de lutitas y areniscas con escasas capas de carbón y niveles calcáreos de distinto espesor e irregularmente distribuidos. El Grupo Sama (~2.200 m) está integrado por depósitos principalmente costeros con algunos intervalos relativamente importantes de carácter aluvial. Estos depósitos son alternancias de pizarras (lutitas, limolitas) y areniscas con abundantes capas de carbón y escasos niveles calcáreos. Presenta además varios niveles de conglomerados, de clastos silíceos y carbonatados. Cabe citar la división en «paquetes» del Grupo Sama, de muro a techo geológicos: «Generalas», «San Antonio», «María Luisa», «Sotón», «Entre-regueras», «Sorriego» y «Modesta-Oscura». En los pozos objeto de estudio principalmente se minaron los paquetes inferiores.

Climáticamente, esta zona se caracteriza por tener un microclima oceánico, con precipitaciones abundantes, en torno a los 1.080 l/m² anuales de media. 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. A pesar del clima lluvioso y de temperaturas moderadas, en ocasiones pueden darse si-

tuaciones de aridez en los meses estivales debido a una elevada evapotranspiración y a un descenso del régimen de lluvias. La temperatura media anual resulta ser de 13,5° C.

Desde la perspectiva hidrogeológica, el área de estudio se caracteriza por la presencia de materiales predominantemente 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.

Materiales y metodología

Se describen los materiales empleados y metodologías seguidas en cada uno de los estudios de diferente índole que ha sido necesario realizar:

■ **Estudio climático.** Se realizó teniendo en cuenta los registros de 31 estaciones pluviométricas de las que se disponía de información (cubriendo una superficie de 1.170 km², centrada en la zona de estudio). Como los intervalos de registro no coincidían en todas ellas, se procedió a realizar las correcciones y a completar las series de datos mediante el método de dobles masas, comparando la serie pluviométrica de la estación problema



El río Caudal atraviesa el área de estudio del trabajo.

con la misma medida en la estación base⁽⁴⁾, para lo cual se han considerado estaciones base la de Oviedo (El Cristo) y la de Santa Cruz de Mieres, por su prolongado periodo de funcionamiento y la fiabilidad contrastada de sus datos. Como resultado, se han obtenido mapas estables de isoyetas (para un año medio, húmedo y seco), de isotermas, de evapotranspiración potencial y real y de isoyetas de lluvia útil. Finalmente, se ha realizado un análisis detallado de la zona de estudio (valle del río Turón).

■ **Estudio hidrológico de la cuenca del río Turón.** Para el cálculo de los caudales de máxima avenida, en primer lugar, se ha realizado un estudio pluviométrico que permita conocer la máxima intensidad de precipitación histórica, a partir de los datos de la estación termopluviométrica más representativa (Santa Cruz de Mieres); para determinar la probabilidad de presentación de un aguacero en función de su intensidad media y para una duración dada, se ha considerado la metodología clásica (ajuste de Gumbel); finalmente, se han obtenido los caudales de máxima avenida para varios periodos de retorno, según diversos métodos. Por otra parte, para los aforos del río Caudal, se han usado dos métodos: la medición con molinete (principalmente) y el aforo químico. Se realiza un aforo directo mensual en tres puntos de aforo, aguas arriba y abajo de las principales labores mineras (fig. 1), e indirecto diario, mediante la lectura de escalas limnométricas colocadas en dichos puntos de aforo, en los que, además, se han



Valle del Turón, otro de los ámbitos en que se desarrolla el presente estudio.

determinado *in situ* los siguientes parámetros: pH, salinidad, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, turbidez, temperatura y Eh, mediante el empleo de una sonda multiparamétrica, marca TURO.

■ **Cubicación de volúmenes de huecos.** 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 (los datos anteriores a 1970 habían sido destruidos). En función del tipo de explotación (relleno o hundimiento), se han considerado criterios de cálculo de huecos residuales diferentes^(5,6)

(Celada, 2009; Toraño, 2009, comunicaciones orales). Contrastando con el cálculo del volumen de agua infiltrada durante el periodo de inundación, 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, junto con el correspondiente a otros huecos (galerías, caña de pozos, embarques, etc.).

■ **El embalse minero y el rebote del nivel piezométrico.** Se ha determinado el periodo de retardo de la infiltración media en los pozos objeto de estudio por comparación de los registros de precipitación con los datos de bombeo, cuando éstos estaban disponibles. Para el modelo conceptual se ha propuesto un flujo predominantemente vertical, definido por la fracturación. También se ha analizado en detalle el proceso de inundación de los pozos, correlacionando la recuperación del nivel piezométrico con el agua infiltrada y el volumen de huecos estimado.

■ **Hidroquímica del agua de mina.** Se han realizado análisis completos puntuales del agua más superficial de los pozos

Mediante el cálculo de huecos residuales de la explotación minera Barredo-Figaredo, contrastado con el de agua infiltrada durante su proceso de inundación, se ha estimado el volumen del embalse subterráneo en 6,2 hm³ a la cota actual de inundación

Santa Bárbara, San José, Figaredo y Barredo, así como perfiles en profundidad de pH, temperatura y conductividad eléctrica en el pozo Barredo.

■ **Modelo térmico.** A efectos de conocer los factores que afectan a la conductividad térmica de las rocas de las sucesiones de Barredo-Figaredo, se ha determinado la mineralogía, textura y porosidad de las mismas mediante su estudio en lámina delgada con microscopía óptica de polarización y se ha aproximado su conductividad térmica mediante el modelo de la media geométrica.

■ **Modelo hidrogeológico conceptual.** Para establecer el balance hídrico se analizaron cada uno de los términos de la ecuación general del balance hídrico (entradas=salidas), con la particularidad de que parte de la escorrentía superficial pasa a ser escorrentía subterránea al infiltrarse cuando atraviesa las zonas más minadas.

■ **Análisis técnico-económico del aprovechamiento.** Se han contemplado tres opciones: (1) Aprovechamiento para abastecimiento: los pozos Barredo y Figaredo, actualmente clausurados, constituyen el ya definido «embalse minero» susceptible de ser aprovechado para abastecimiento no sólo energético, sino también humano e industrial. Ambos pozos 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. (2) Aprovechamiento energético mediante bomba de calor, ya que su consumo energético es menor que la energía térmica facilitada y a los precios actuales supone un ahorro económico importante; (3) Aprovechamiento mediante minicentral hidráulica durante la devolución de caudales en la regulación al interior del embalse, produ-

ciendo energía en horas punta y bombeando en horas valle.

Resultados

Se sintetizan a continuación los resultados obtenidos, distribuidos en los mismos apartados que en el capítulo anterior:

■ **Estudio climático.** Se presentan en la figura 2 los mapas de isoyetas e isothermas medias anuales para toda la zona a la que se ha extendido el estudio. En particular, para la zona de estudio (valle del Turón), la precipitación de

un año hidrológico medio es de unos 1.080 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 (tomando 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,

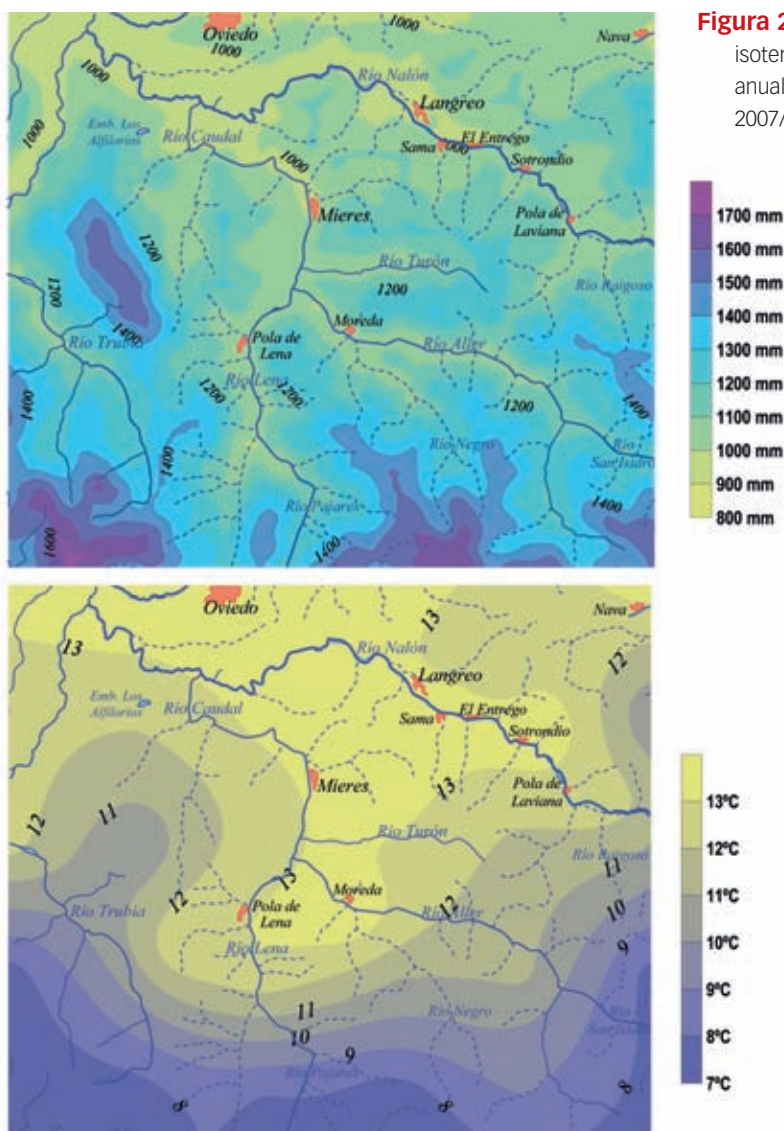


Figura 2. Isoyetas e isothermas medias anuales (1970/71 - 2007/08).

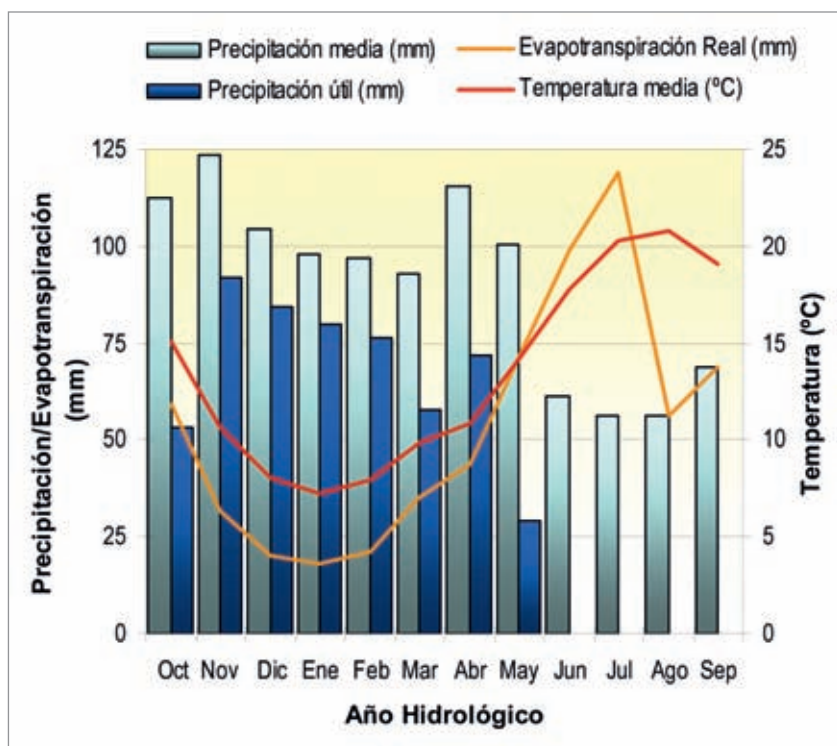


Figura 3. Variación de precipitación, temperatura y evapotranspiración real a lo largo de un año hidrológico medio en la zona de estudio.

la lluvia útil es inexistente en los meses de verano. Estos resultados se representan gráficamente en la figura 3.

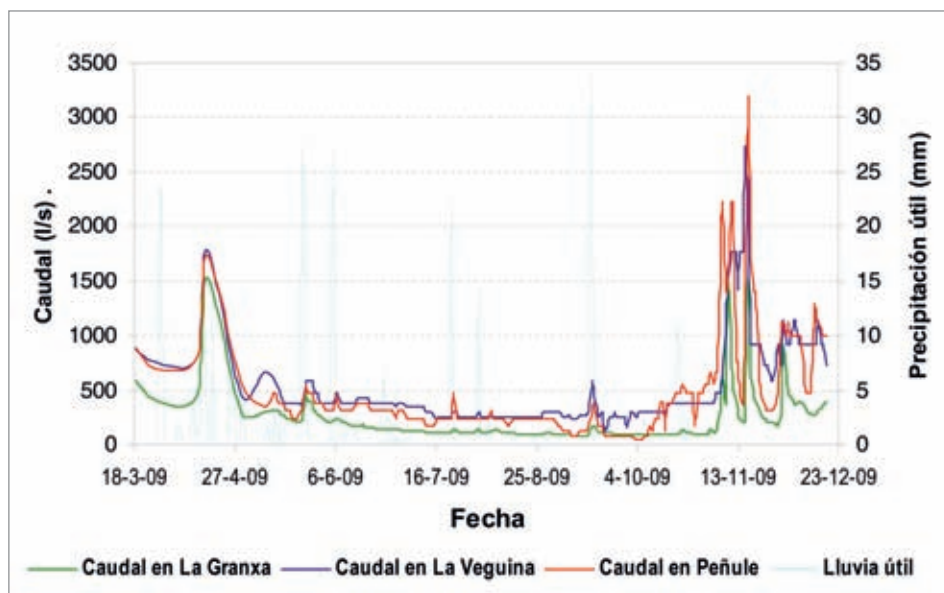
■ **Estudio hidrológico de la cuenca del río Turón.** El caudal de máxima avenida de la cuenca del río Turón se ha calculado por diversos métodos, estimándose en unos 50, 150 y 250 m³/s para tiempos de retorno de 2, 50 y 500 años, respectivamente; no obstante, las recientes obras de encauzamiento del tramo final del río, con un ensanchamiento de más de 12 metros de ancho de cauce, no hacen temer por posibles desbordamientos/inundaciones tras episodios tormentosos, que se ha comprobado no suelen superar las dos horas. Los aforos del río Turón se realizaron mensualmente con molinete y diariamente por medida de las alturas limnimétricas, en tres secciones diferentes (La Granxa –situada en cabecera–, La Veguina –intermedia– y Peñule –situada cerca del punto de desagüe de la

cuenca–). 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, 5.300 m³/día, que son infiltrados en esta tercera sub-

cuenca 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. Los hidrogramas obtenidos en cada estación se representan de forma conjunta en la figura 4, en la que se observa que las puntas de caudal coinciden con valores elevados de precipitación útil.

En cuanto a la calidad del agua superficial, 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 (recientemente) 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

Figura 4. Hidrogramas de las tres secciones de aforo, comparadas con la precipitación útil (disponible sólo hasta octubre de 2009).



al punto de vertido. 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 circunneutros, ni del resto de parámetros medidos. 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). 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 el caudal ambiental. Sin embargo, a partir del completado de la serie de datos a partir de la de otro río próximo (río Aller) y aforado regularmente por la Confederación Hidrográfica del Cantábrico, así como al realizar el balance hídrico de la cuenca, se deduce que su caudal medio es de unos 700 l/s, por lo que se estima el caudal ambiental en torno a 70 l/s.

■ **Cálculo de volúmenes de huecos.** 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 hueco útil será el resultante de multiplicar el volumen deshullado por los coeficientes que suponen la reducción porcentual del hueco inicial abierto (0,2 para la explotación con relleno y 0,3 para la explotación con hundimiento). A partir de estas toneladas arrancadas (densidad media del carbón, 1,6 t/m³), es posible calcular el volumen dejado por las toneladas deshulladas, al que habrá que

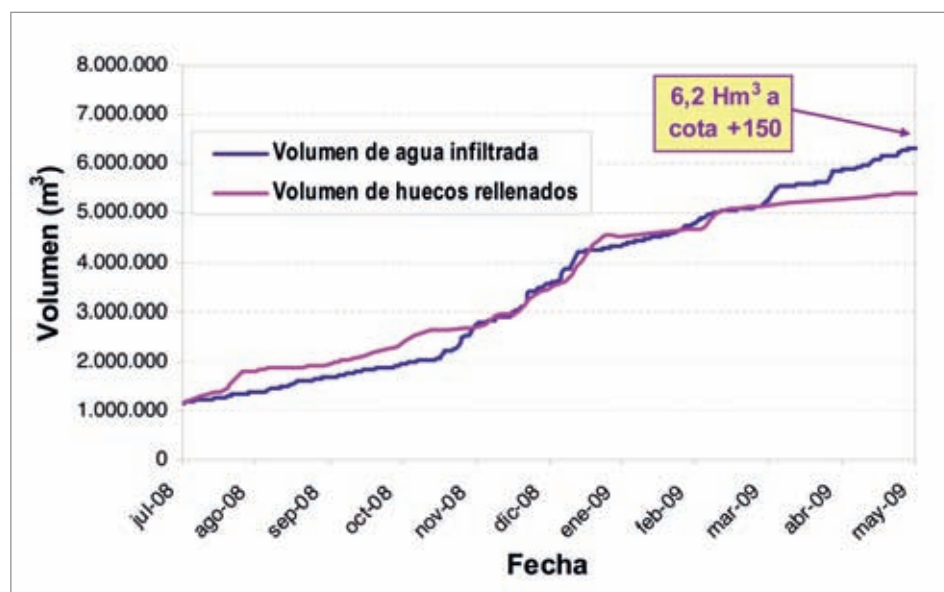


Figura 5. Variación temporal del volumen de llenado de los huecos durante la inundación y el de agua infiltrada al interior de los mismos.

sumar el volumen de galerías (8 m² de sección media, considerando convergencia), que se multiplica por los kilómetros de galería en cada planta. Finalmente, el hueco dejado por las cañas de los pozos se calcula multiplicando su longitud por una sección útil de 25 m² y, para obtener el hueco dejado por las zonas de los embarques principales, se estima una sección útil de 20 m² y una longitud total de 300 metros por embarque. Esta estimación de 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.

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 a la que se le sustrajo la evapotranspiración real calculada para el mismo periodo. Conocido el periodo de retardo de la infiltración (19 días), 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 relaciona la infiltración con la lluvia útil (ver apartado siguiente).

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, con la que se elabora el gráfico de la figura 5.

Como era de esperar, ambas curvas se ajustan bien en los niveles intermedios (mejor conocidos en cuanto a su explotación), lo cual permite validar la aproximación, y difieren sustancialmente (1,2 hm³) en los superiores, parte de cuya producción no había sido completamente estimada. Así, se ha incrementado el volumen de huecos en los niveles superiores de ambos pozos hasta hacer ajustar ambas curvas. El volumen de huecos resultante del sistema Barredo-Figaredo, tanto por m lineal como acumulado, se representa

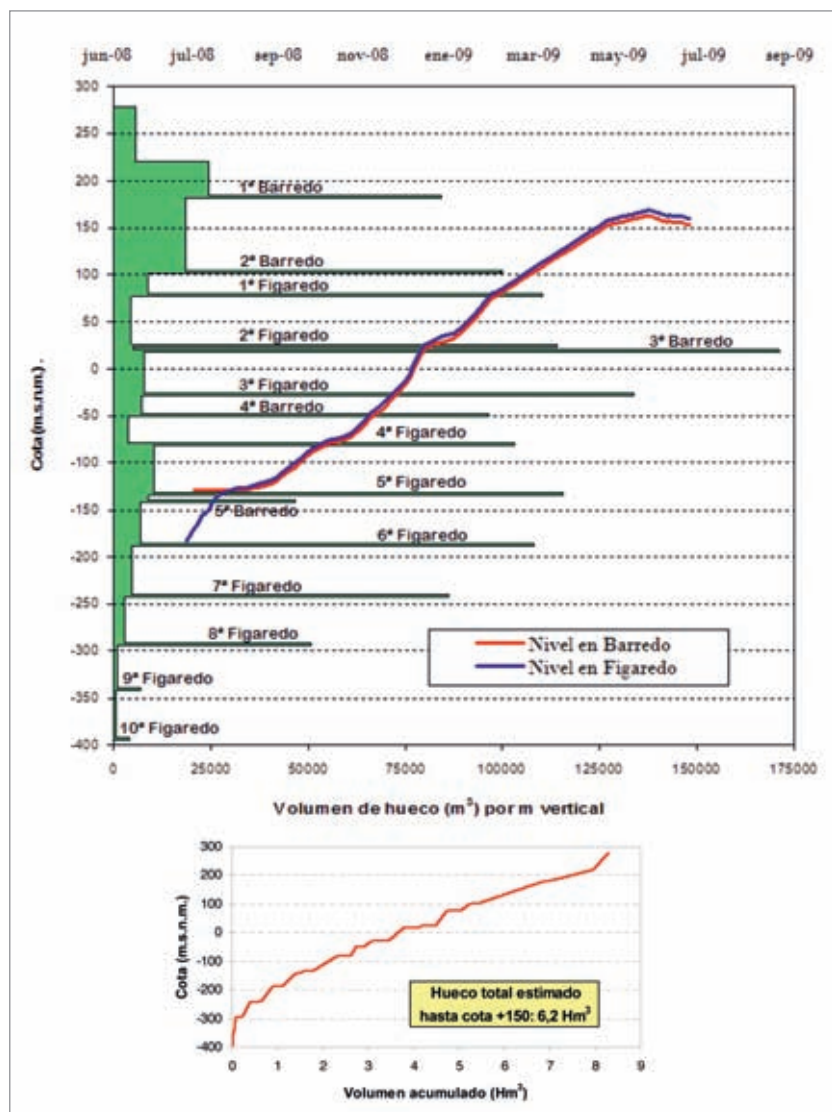


Figura 6. Volumen de huecos del embalse minero Barredo-Figaredo por m lineal, comparado con los niveles de recuperación del nivel piezométrico durante la inundación de ambos pozos. Volumen acumulado de huecos del mismo embalse.

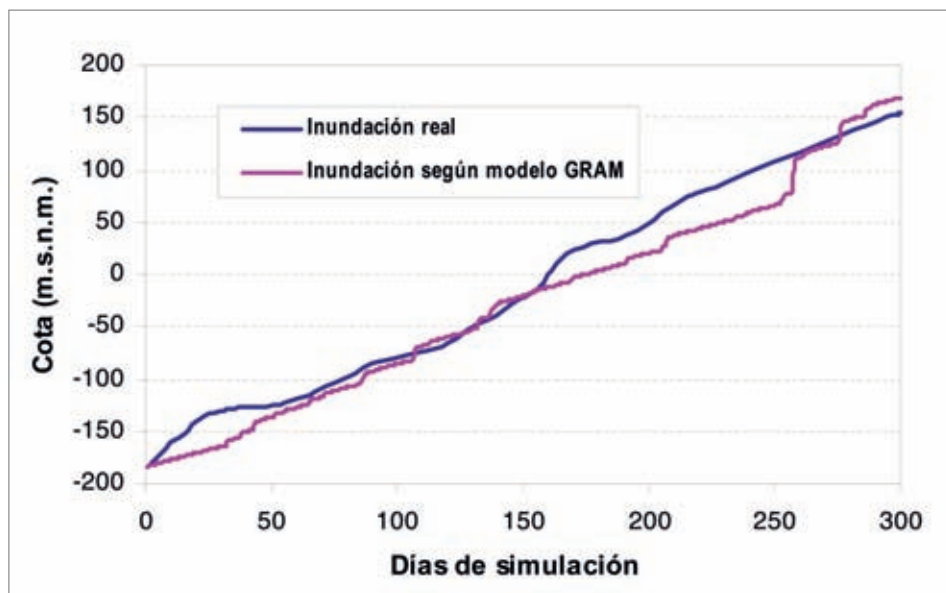
en la figura 6. Se estima que a la cota actual de inundación (+150 m.s.n.m., 70 metros bajo el brocal del pozo Barredo), el volumen total del embalse es de 6,2 hm³.

En esta misma figura se observan las curvas de recuperación correspondientes a ambos pozos frente al volumen de huecos en cada cota. Lógicamente, la velocidad de ascenso depende del volumen de infiltración (y consecuentemente

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.

Se ha intentado modelizar la inundación por medio del modelo GRAM (*Groundwater Rebound in Abandoned Mineworkings*), herramienta desarrollada por la Universidad de Newcastle upon Tyne (Inglaterra) para mejorar el conocimiento de los sistemas mineros abandonados evaluando distintas alternativas conceptuales, ante el generalmente escaso volumen de datos conocidos⁽⁷⁾. Se ha podido observar la crítica dependencia de factores como el volumen de agua de entrada al sistema, el porcentaje de escorrentía y el coeficiente de almacenamiento. Asignando a este último un valor de 0,08, se han obtenido resultados satisfactorios, pues los niveles obtenidos reproducen aquellos observados en la práctica (figura 7), permitiendo comprender mejor el

Figura 7. Comparación entre el proceso de rebote del nivel piezométrico medio en el embalse Barredo-Figaredo y el simulado modelo GRAM.



Mediante la regulación del embalse minero Barredo-Figaredo se podría satisfacer actualmente la demanda de abastecimiento (previo tratamiento) de una población de 68.000 habitantes y duplicarla con sólo tomar un caudal de 130 l/s del río Aller

proceso de inundación, de forma que la experiencia obtenida en la modelización pueda ser aplicada a otros casos semejantes antes de su inundación, con fines predictivos.

■ **El embalse minero y el rebote del nivel piezométrico.** Para el periodo 2002-2007, se ha calculado en trabajos anteriores^(8,9) que el desagüe anual promedio del sistema Barredo-Figaredo es de 4,1 hm³/año. Para poder determinar el periodo de retardo de la infiltración, se han comparado los días de máximo desagüe (que figuran en los planes de labores) con las puntas de lluvia útil registradas en los días anteriores (pozo Figaredo), así como los escasos datos diarios de bombeo disponibles con la lluvia útil correspondiente (pozo Barredo). Así, se ha concluido que el periodo de retardo de la infiltración en el conjunto Barredo-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⁽¹⁰⁾.

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). Teniendo en cuenta los datos de caudales bombeados (es decir, agua infiltrada) y lluvia útil, se ha tratado de establecer una relación entre ambas. Considerando el área de la cuenca de afección de los pozos Barredo y Figaredo (18,59 km²), se obtiene que la infiltración mensual supone aproximada-

mente un 20-23% de la lluvia útil mensual (en m³, y considerando un retardo de 19 días), al que se suma una constante (150.000 m³/mes) no supeditada al aporte pluvial. En esta aportación extra no intervienen aportes de acuíferos conexos, por la escasa permeabilidad de las rocas. 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. La expresión que más fielmente relaciona la lluvia útil diaria con la infiltración al interior del embalse minero Barredo-Figaredo es la siguiente:

$$\text{INFILTRACIÓN (m}^3/\text{día)} = 0,23 \cdot \text{LLUVIA ÚTIL (m}^3/\text{día)} + 5.300 \text{ (m}^3/\text{día)}$$

■ **Hidroquímica del agua de mina.** Se han medido semanalmente, *in situ*, el pH, la temperatura y la conductividad eléctrica en los pozos estudiados. Adicionalmente, se realizaron estudios hidroquímicos para valorar un posible aprovechamiento del agua para abastecimiento.

En lo que respecta al pH, en el agua del pozo Figaredo varía entre 6,7 y 8, con un valor medio de 7,3. En el pozo Barredo el pH se encuentra entre 6,9 y 8,1, con un valor medio de 7,5. En cuanto a la conductividad eléctrica, el agua del pozo Figaredo oscila entre 1.474 y 5.773 µS/cm, con un valor medio de 3.134. El agua del pozo Barredo varía en este parámetro entre 1.271 y 2.070 µS/cm, con un valor medio de 1.531. Mientras que la conductividad eléctrica se mantiene en general para el pozo Barredo entre 1.000 y 2.000 µS/cm, en el pozo Figaredo se han detectado conductividades mucho más altas y una mayor fluctuación. Se observa además un descenso de estas conductividades a partir de 2008, lo que puede ser debido a la mezcla con el agua del



El río Aller tiene un caudal medio de 6,7 m³/s y un caudal ambiental de 700 l/s.

El aprovechamiento energético mediante bomba de calor del agua del pozo Barredo para la climatización de dos edificios universitarios reducirá, respecto a un sistema convencional, un 74% el consumo energético y un 40% las emisiones de CO₂

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, 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.

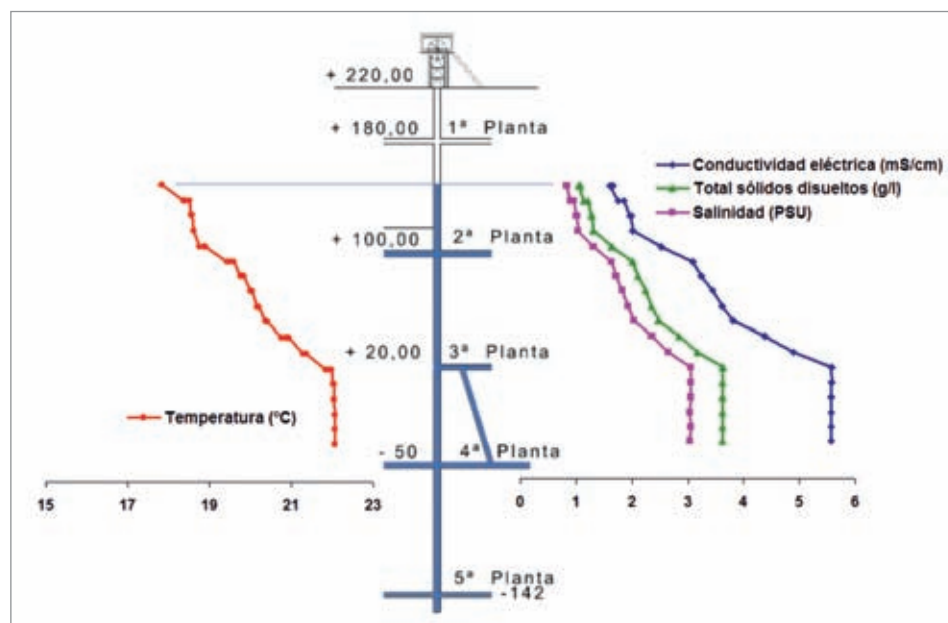
A partir de los anteriores análisis y aplicando las exigencias de la Directiva 75/440/CEE, actualmente en vigor, en cuanto a los tratamientos previstos para el agua bruta de estos pozos si se destinase al abastecimiento humano, se deduce que, debido a los altos contenidos en ambos pozos de hierro y manganeso, habría que aplicarles un tratamiento físico intensivo. El estudio de calidad que se ha llevado a cabo por parte de la empresa Hunosa ha determinado que se trata de aguas bicarbonatado-sódicas, 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⁽¹¹⁾. Los valores de temperatura de las muestras tomadas (del agua más su-

perficial de la caña del pozo) han seguido un ligero descenso a medida que ha ido ascendiendo el nivel de agua. 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 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 la tercera planta (cota +20), a partir de la cual se estabilizan (figura 8). Como promedio, la temperatura aumenta desde unos 17°

C en contacto con la atmósfera hasta 22° C a partir de 200 metros desde la superficie.

■ **Modelo térmico.** Se han determinado las conductividades térmicas de los materiales que limitan el embalse minero Barredo-Figaredo basándose en el modelo de la media geométrica, que considera la conductividad térmica de la roca como una función de la porosidad de la misma: $k = k_m^{(1-\phi)} \cdot k_f^\phi$ (k_m y k_f , conductividades de la roca matriz y el fluido, respectivamente; ϕ , porosidad). Con objeto de conocer la composición mineralógica de la matriz rocosa y su porosidad, se tomaron trece muestras de roca representativas de la columna estratigráfica del pozo Barredo, que fueron estudiadas en lámina delgada. Se trata, por orden de importancia cuantitativa, de litarenitas (filarenitas), grauvacas líticas, lutitas y cuarciarenitas. El componente petrográfico fundamental mayoritario es el cuarzo. Mediante los procedimientos UNE-103-301-94 y UNE-103-300-93 se determinaron la densidad y la porosidad. Se usaron valores tabulados de conductividades térmicas de los minerales presentes^(12,13) y, aplicando la expresión anterior, se ob-

Figura 8. Perfiles de varios parámetros registrados a lo largo de la caña del pozo Barredo.



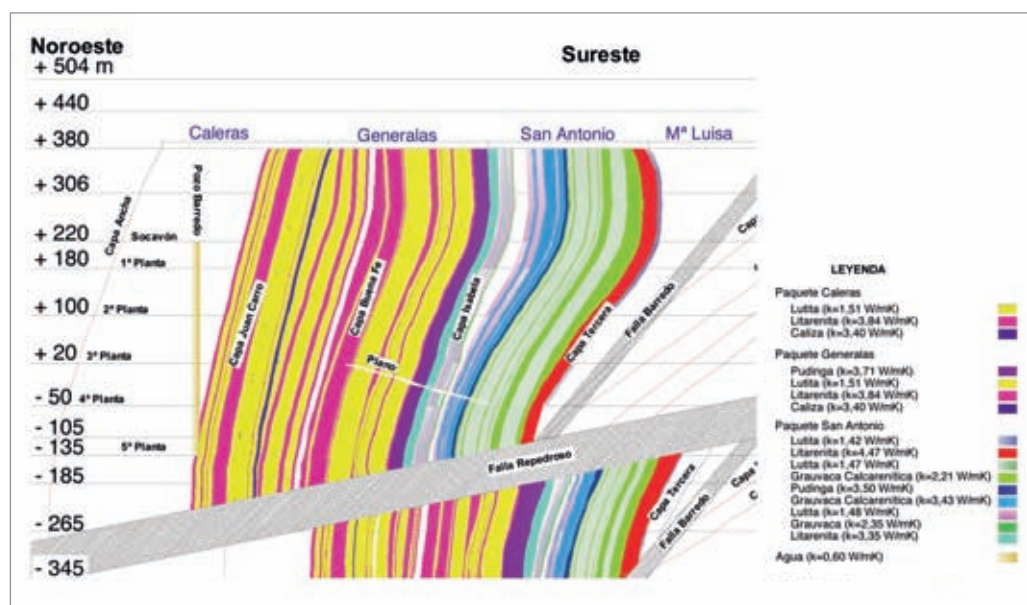


Figura 9. Sección NW-SE del pozo

Barredo, indicando las conductividades térmicas calculadas para los distintos materiales geológicos.

tiene un valor de conductividad térmica representativo de cada nivel litológico individualizable. De forma sintética, el modelo se presenta en la figura 9.

■ Modelo hidrogeológico conceptual.

A partir de las relaciones comentadas en los apartados anteriores, junto con los datos climáticos y los de aforo de caudal, es posible realizar un modelo hidrogeológico conceptual simplificado para un año medio de la cuenca del río Turón, antes y después del cese del bombeo (figura 10).

■ Análisis técnico-económico del aprovechamiento hídrico y energético.

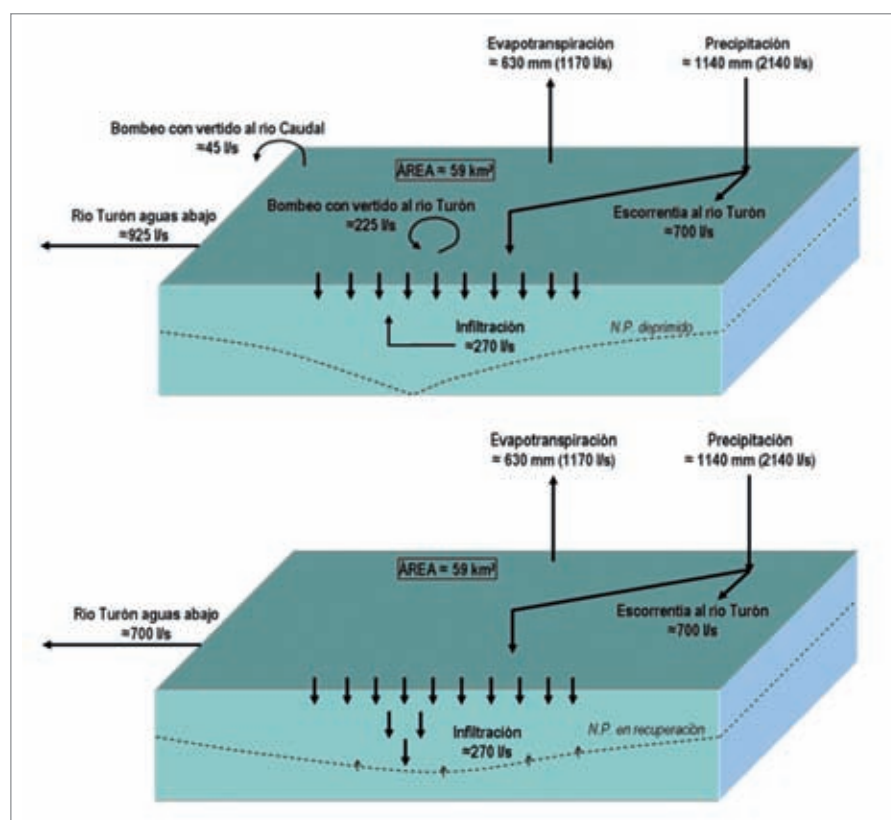
Se consideran en este apartado tres tipos de aprovechamiento:

■ Aprovechamiento para abastecimiento. Considerando la infiltración al embalse minero Barredo-Figaredo como la suma de los caudales bombeados en ambos pozos el año 2005 y suponiendo un consumo constante de 172 litros por habitante y día (media de Asturias), se obtiene que 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, tras un tratamiento previo del agua). Dadas las aportaciones existentes, el consumo no podría incrementarse mucho más, aun cuando el volumen de embalse fuese mayor. La posibili-

dad 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. Por ejemplo, bastaría «importar» durante los seis meses de déficit (segunda 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), 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,

Figura 10. Modelo conceptual simplificado de balance hídrico en la zona de estudio (cuenca del río Turón) para un periodo anual, antes y después de la interrupción del bombeo.



que sería sólo de 0,13 hm³ entre los meses de mayo y junio.

- Aprovechamiento energético mediante bomba de calor. 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 aprovechado mediante bomba de calor. El primer proyecto que utiliza este fluido geotérmico, hasta ahora desaprovechado, para la climatización de dos edificios del campus universitario de Mieres 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%.

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 y de un caudal desaguado anual de 30 hm³. Si se considera el salto térmico que optimiza el rendimiento energético de un sistema con bomba de calor⁽⁶⁾, se obtiene: $P_f \approx 19,91 \text{ MW}_t$ (potencial térmico del foco frío) y $P_c \approx 24,4 \text{ MW}_t$ (potencial térmico del foco caliente). Tomando valores del COP de la bomba de calor habituales para los saltos térmicos que se consideran (12-17° C, para producir agua caliente a 45° C), se estima en 4,53 MW el trabajo –en forma de energía eléctrica– que se debe aportar al compresor de la bomba de calor: es decir, un consumo de 4,5 MW_{eléctricos} generaría una potencia térmica de calefacción de 24,4 MW_t.



Castillete del pozo Barredo, cuya profundidad máxima es de 355 metros.

Puesto que 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 $4,5 \cdot 24 \cdot 365 = 39.683 \text{ MWh}_{\text{eléctricos}}$.

- Aprovechamiento energético mediante minicentral hidráulica. En la aplicación al pozo Barredo, considerando un salto neto de 72,5 m y un caudal medio de retorno al pozo de 0,6 m³/s, la potencia instantánea sería: $P = 8,34 \cdot Q \cdot H_n = 362,8 \text{ kW}$ (Q, caudal en m³/h, H_n, altura neta en m). Por tanto, en una primera aproximación, de acuerdo con las tarifas vigentes, 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. Suponiendo que el agua se turbinaba en horas punta (16 horas/día) y se bombea en horas valle (8 horas/día), y según lo establecido en el RD 661/2007 (regulación de la actividades de generación eléctrica), se alcanzarían

unos ingresos anuales de 218.731 €, no considerando el coste derivado de bombear el caudal turbinado (28.987 €), ya que éste estaría incluido en el balance económico de la bomba de calor y se tendría aunque no existiese el aprovechamiento mediante minicentral hidráulica.

Conclusiones

A partir del trabajo realizado en el marco de esta investigación, se presentan, a modo de síntesis, las siguientes conclusiones y recomendaciones generales:

- La zona estudiada, ubicada dentro de la Cuenca Carbonífera Central asturiana, 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 y/o energético de muy diversas formas.
- Esta zona se caracteriza por tener un microclima oceánico, con precipitaciones abundantes, en torno a 1.080

Se podría realizar un aprovechamiento hidroeléctrico del agua de retorno del sistema anterior, inyectándola en la parte superior del pozo Barredo y turbinándola en la parte inferior, produciendo energía en horas punta y bombeando en horas valle

l/m² anuales de media, nubosidad persistente y una temperatura media anual de 13,5° C. La evapotranspiración real media anual es de 642 mm y la lluvia útil se estima en 444 mm.

- Geológicamente, la zona de estudio se caracteriza por la presencia de materiales de edad Carbonífera (piso Westfaliense D) muy replegados y tectonizados, originando estructuras complejas. Sedimentológicamente, la zona está formada por una serie de parasecuencias costeras compuestas por una sucesión cíclica de areniscas, lutitas y capas de carbón.
- 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 acuíferos 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, con una triple porosidad similar a la de los acuíferos carbonatados kársticos.
- Tras realizar aforos en tres estaciones del río Turón, se tiene que en el punto de muestreo de cabecera los caudales varían entre 50 y 600 l/s en el punto medio, entre 143 y 1.775 l/s, y en el punto próximo a la salida, entre 121 y 1.734 l/s. Por otro lado, cabe destacar el hecho de que en la estación de Pe-

ñüle (cerca de la desembocadura) se registre, como norma general, menos caudal que en la estación La Veguina (aguas arriba de la anterior), indicando que entre dichos puntos se produce una significativa infiltración, estimada en 61 l/s, debido 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.

- 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 procedente del bombeo de pozos (que sobre todo hace aumentar su temperatura y conductividad eléctrica).
- La infiltración que recarga el embalse constituido por las labores de los pozos Barredo y Figaredo resulta 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. En la subcuenca Barredo-Figaredo es válida la siguiente relación: INFILTRACIÓN (m³/día) = 0,23 · LLUVIA ÚTIL (m³/día) + 5.300 (m³/día). 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, se evapotranspira más del 55% de la precipitación, estimándose la lluvia útil en unos 510 mm, de los cuales más del 70% genera escorrentía y el resto se infiltra.

- A partir de datos de tonelaje extraído (aplicando coeficientes de reducción del hueco residual según el método de explotación) y de estimación de galerías y otros huecos, se ha estimado el volumen de huecos del sistema Barredo-Figaredo, que se ha contrastado con el de agua infiltrada durante el proceso de inundación del mismo, para llegar a un volumen del embalse subterráneo de 6,2 hm³ a la cota actual de inundación (+150 m.s.n.m.).

- Como promedio, la temperatura del agua del pozo Barredo aumenta desde unos 17° C en contacto con la atmósfera hasta 22° C a partir de 200 metros desde la superficie.

- Los valores obtenidos para la conductividad térmica de los macizos rocosos atravesados en las labores 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 Barredo-Figaredo:

- Se podría satisfacer la demanda de abastecimiento de una población de aproximadamente 68.000 habitantes (0,35 hm³/mes), acumulando agua en los meses de superávit (primera mitad del año) para ser usada en los meses de déficit. 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



Instalaciones del pozo Figaredo, situado en el valle de Turón, en el concejo de Mieres.

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.

- Los valores de caudal y temperatura de las aguas almacenadas en huecos mineros indican un potencial geotérmico que puede ser aprovechado mediante equipos de bomba de calor, constituyendo un recurso ener-

gético que hasta el momento estaba siendo desaprovechado, reactivando la economía de las zonas mineras y permitiendo realizar un abandono sostenible de las labores. En particular, la futura climatización de dos edificios universitarios mediante este sistema reducirá un 74% el consumo energético y un 40% las emisiones de CO₂, en comparación con un sistema convencional.

- Se podría realizar un aprovechamiento hidroeléctrico del agua mediante minicentral hidráulica, inyectando el agua de retorno (una vez utilizada para las aplicaciones de bomba de calor expuestas) en la parte superior del pozo Barredo y turbinándola en la parte inferior, aprovechando la diferencia económica resultante de producir energía en horas punta y bombearla en horas valle. Estimando salto y caudal, pudo obtenerse la potencia instalada y la producción media, así como el balance económico, según el cual se tendrían unos ingresos superiores a 200.000 €. ♦

Agradecimientos

Gracias a la Ayuda a la Investigación concedida por FUNDACIÓN MAPFRE en la convocatoria 2008 ha sido posible realizar el presente estudio. También se debe agradecer la colaboración de la empresa Hunosa, la Confederación Hidrográfica del Cantábrico, la Dirección General de Industria y Energía, el Archivo Histórico de Oviedo y la Agencia Estatal de Meteorología, así como la ayuda de muchas personas, entre las que destacan Cecilia, Aurelio y Eladio, que diariamente recogen las alturas limnimétricas del río Turón.

PARA SABER MÁS

- | | | | |
|--|---|---|---|
| <p>[1] Pendás, F.; Loredo, J., Ordóñez, A. Exploración, evaluación y explotación de metano en capas de carbón. Instituto Geológico y Minero de España, 2002. Vol. 1, 224 p.</p> <p>[2] Pendás, F.; Loredo, 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.</p> <p>[3] García-Loygorri, A. El Carbonífero en la Cuenca Central Asturiana. Trabajos de Geología. Universidad de Oviedo. 1971. Nº 3. p. 101-150.</p> <p>[4] Martínez Alfaro, P.E., Martínez Santos, P., Castaño Castaño, S.</p> | <p>Fundamentos de hidrogeología. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 2006.</p> <p>[5] Degas, M., Wojtkowiak, F., Metz, M., Branchet, M., 2003. Stabilite de la surface apres l'exploitation totale du charbon et l'arret des pompages d'exhaure miniere. Actas del congreso Après-mines 2003, Nancy, Francia. http://gisos.ensg.inplnancy.fr/UserFiles/File/PM_2003/De-gas.pdf</p> <p>[6] 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.</p> <p>[7] Kortas, L., Younger, P.L. Using</p> | <p>the GRAM model to reconstruct the important factors in historic groundwater rebound in part of the Durham Coalfield, UK. Mine Water and the Environment. 2007. Nº 26, p. 60-69.</p> <p>[8] Jardón, S. Aprovechamiento de las aguas de mina en la Cuenca Central Asturiana como recurso energético. Memoria de Investigación. 2008.</p> <p>[9] 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.</p> <p>[10] García-Fuente, P.A. Sistema experto de predicción de desagües en minas subterráneas de car-</p> | <p>bón. Aplicación al Grupo Aller de Hunosa. 1996.</p> <p>[11] 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.</p> <p>[12] 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.</p> <p>[13] Horai, K.. Thermal conductivity of rock-forming minerals. Journal of Geophysical Research. 1971. Vol. 76. No. 5. p 1278-1308.</p> |
|--|---|---|---|