

Lección inaugural 2022_2023

«Divino regalo fue este del agua, imagen del alma buena y del claro pensamiento; entre todas las cosas bellas y útiles del mundo, ninguna me parece tan digna de amor, casta, alegre y sencilla, símbolo de la sobriedad y del ánimo sereno; su turbulencia es fecunda y noble su reposo.»

¡Agua pura, agua mansa, agua de nieve, agua de cielo, agua de roca; bendita seas, hermana por tu humildad, por tu belleza, por tu alegría! Cuando los hombres aprendan a vivir, la tierra se llenará de estanques y acueductos, de pozos y cisternas, caños sonoros y bulliciosas corrientes; el mundo será un jardín y el agua saltará copiosa en mármoles como antaño.»

Ricardo León (*La escuela de los sofistas*, 1912)

SOBRE LA PONENTE

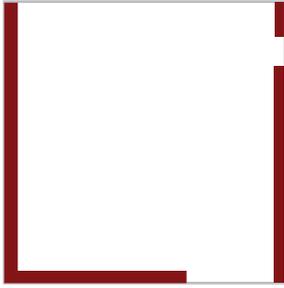


María Almudena Ordóñez Alonso es catedrática de la Universidad de Oviedo, adscrita al área de Prospección e Investigación Minera del Departamento de Explotación y Prospección de Minas.

Dra. ingeniera de Minas por la Universidad de Oviedo, cuenta con 25 años de experiencia docente e investigadora. Sus principales líneas de investigación son la hidrogeología minera, el aprovechamiento energético del agua subterránea, los aspectos ambientales relacionados con el cierre y abandono de minas y la geoquímica urbana. En la actualidad, lidera el grupo de investigación acreditado "Investigación del Subsuelo y Medio Ambiente" (ISYMA). Su actividad investigadora, respaldada con publicaciones en revistas internacionales y cuatro sexenios de investigación, es fruto de su participación en diversos proyectos de investigación competitivos, tanto nacionales como europeos, y en un buen número de colaboraciones con empresas, esencialmente del sector minero, así como la codirección de varias tesis doctorales. A lo largo de su trayectoria ha recibido, tanto a nivel individual como de grupo, algunas distinciones, en su mayor parte por trabajos relacionados con la hidrogeología y el aprovechamiento energético de aguas de mina y residuales urbanas (premio de la International Mine Water Association, mejor artículo del año de la revista *Mine Water and the Environment* en 2013, primer premio del concurso EDRP University Challenge en 2019 y 2020).

Su actividad docente en la Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo, desde la implantación del Espacio Europeo de Educación Superior, se centra en las materias Tecnología hidrogeológica del grado en Ingeniería de Tecnologías Mineras y Recursos hidromineros y geotérmicos y Prospección de la contaminación y sostenibilidad en industrias extractivas y energéticas del máster en Ingeniería de Minas.

En esta lección nos invita a reflexionar sobre la relevancia del agua subterránea y en particular sobre las posibilidades de aprovechamiento del agua de mina como recurso, en el marco de la economía circular en un contexto regional.



Lección inaugural
2022_2023

AGUA, MINA Y ECONOMÍA CIRCULAR

M.^a Almudena Ordóñez Alonso
Catedrática del Área de Prospección e Investigación Minera
Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo



Reconocimiento-No Comercial-Sin Obra Derivada (by-nc-nd): No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.



Usted es libre de copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, bajo las condiciones siguientes:



Reconocimiento – Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el licenciadore:

Ordóñez Alonso, M.^a Almudena (2022). *Agua, mina y economía circular*
Universidad de Oviedo.

La autoría de cualquier artículo o texto utilizado del libro deberá ser reconocida complementariamente.



No comercial – No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin obras derivadas – No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

© 2022 Universidad de Oviedo

© La autora

Algunos derechos reservados. Esta obra ha sido editada bajo una licencia Reconocimiento-No comercial-Sin Obra Derivada 4.0 Internacional de Creative Commons.

Se requiere autorización expresa de los titulares de los derechos para cualquier uso no expresamente previsto en dicha licencia. La ausencia de dicha autorización puede ser constitutiva de delito y está sujeta a responsabilidad.

Consulte las condiciones de la licencia en: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es>

Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo

ISNI: 0000 0004 8513 7929

Edificio de Servicios - Campus de Humanidades

33011 Oviedo - Asturias

985 10 95 03 / 985 10 59 56

servipub@uniovi.es

www.publicaciones.uniovi.es

ISBN: 978-84-18482-56-4

DL AS 1838-2022



«Divino regalo fue este del agua, imagen del alma buena y del claro pensamiento; entre todas las cosas bellas y útiles del mundo, ninguna me parece tan digna de amor, casta, alegre y sencilla, símbolo de la sobriedad y del ánimo sereno; su turbulencia es fecunda y noble su reposo.

¡Agua pura, agua mansa, agua de nieve, agua de cielo, agua de roca: bendita seas, hermana por tu humildad, por tu belleza, por tu alegría! Cuando los hombres aprendan a vivir, la tierra se llenará de estanques y acueductos, de pozos y cisternas, caños sonoros y bulliciosas corrientes; el mundo será un jardín y el agua saltará copiosa en mármoles como antaño.»

Ricardo León (*La escuela de los sofistas*, 1912)



Introducción

La sociedad actual demanda ingentes cantidades de materias primas minerales para poder cubrir sus necesidades básicas y para mantener su confort. La distribución en la corteza terrestre de estas materias primas no es homogénea; además, a pesar de obedecer a procesos geológicos tanto internos como externos conocidos, tampoco es todo lo predecible que se desearía. Este desigual reparto geográfico de los diferentes elementos químicos en las rocas hace que determinados recursos se encuentren muy concentrados en algunos territorios y sean, por el contrario, escasos o inexistentes en otros. La Comisión Europea no es ajena a las reflexiones plasmadas en las líneas anteriores y, perfectamente consciente de lo cruciales que son algunas materias primas de origen mineral para la economía de la Unión Europea (UE), ha elaborado un listado de materias primas críticas (*Critical Raw Materials*, Comisión Europea, 2020a). Este listado incluye a aquellas sustancias que, utilizadas de forma frecuente en nuestra vida diaria de la mano de las denominadas «nuevas tecnologías», no cuentan con un suministro seguro en el medio-largo plazo, creando una situación de incómoda incertidumbre.

La propia Comisión Europea, a través de la comunicación COM 102 final (Comisión Europea, 2020b) propone como estrategia reforzar la autonomía en el suministro de materias primas críticas, advirtiendo a la vez que el tránsito hacia la ansiada neutralidad climática puede pasar por trasladar la dependencia de los combustibles fósiles a la dependencia de materias primas minerales, de las que en muchos casos nos abastecen terceros países. A modo de ejemplo se podría citar que, simplemente considerando las baterías de los vehículos eléctricos y el almacenamiento de energía, en 2030 la UE necesitaría multiplicar por 18 su consumo de litio y por 5 el de cobalto. En la misma línea van las previsiones de la OCDE sobre la tendencia en el consumo de metales, estimando un aumento de los actuales 8.000 a 20.000 millones de toneladas/año en el horizonte 2060 (MITECO, 2020). En este sentido, un dato muy revelador y que invita a la reflexión es que la dependencia de la UE relativa al suministro de la mayor parte de los metales se sitúa

por encima del 75% (de las 30 materias primas que la UE clasifica como críticas, 19 se importan desde China y de algunas de ellas este país tiene un monopolio de facto). Así, con objeto de reducir esta dependencia, y al margen de tratar de diversificar el suministro (inviable en algunos casos), únicamente queda la opción de beneficiar los recursos propios. De hecho, la minería es un sector activo en Europa, ya que según datos de Eurostat, en 2019, 17.000 empresas dedicadas a esta actividad daban empleo a 392.000 personas, aportando 206.000 millones de euros de valor añadido. Por ejemplo, en Andalucía, el sector minero vive, desde hace unos años, un momento dulce, ya que están activas seis explotaciones de minerales metálicos que movilizan más de 2.300 millones de inversiones y que generan más de 4.000 empleos (Surminas, 2022).

España es el tercer país de Europa en abundancia de recursos minerales, algunos de ellos considerados actualmente como estratégicos. En particular, el Principado de Asturias posee una gran riqueza geológico-minera, se podría decir que única, tal como estudiaron en el s. XIX Guillermo Schultz, Máximo Fuertes Acevedo o Luis Adaro y, más recientemente, Ignacio Patac o Manuel Gutiérrez-Claverol y Carlos Luque (1994, 2010), entre otros. Fruto de su geología variada, es muy amplio el abanico de tipología de yacimientos que se localizan en la región asturiana. Además de los recursos energéticos, como el sobradamente conocido carbón, y también petróleo, *shale gas*, etc., también abundan los yacimientos de sustancias metálicas (oro, cobre, cobalto, níquel, mercurio, antimonio, wolframio, molibdeno, hierro, plomo, manganeso o zinc), los depósitos de sustancias no metálicas como fluorita, caolín, yeso, barita, magnesita, etc., los recursos de uso industrial como áridos, refractarios, sílice, rocas ornamentales y de construcción, etc., así como los recursos hidrogeológicos (las aguas subterráneas y como caso particular, las termales y minero-medicinales). Algunos de estos recursos presentan volúmenes y leyes suficientes para poder ser explotados económicamente y fruto de ello es la larga y arraigada tradición minera de Asturias; otros son simplemente indicios.

Como ya se ha mencionado, la última revisión del listado de materias primas críticas (2020) incluye 30 entradas entre elementos químicos, minerales, rocas y otras agrupaciones: antimonio, barita, berilio, bismuto, boro, cobalto, carbón coquizable, fluorita, galio, germanio, tierras raras (ligeras y pesadas), hafnio, fósforo, indio, magnesio, grafito, niobio, elementos del grupo del platino, fosforita, escandio, silicio metal, tántalo, wolframio, vanadio, bauxita, litio, titanio y estroncio.

De entre estas sustancias, un total de siete ya han sido explotadas con anterioridad en el subsuelo asturiano, y la presencia en cantidades atractivas de otras cuatro es posible, teniendo en cuenta el contexto geológico. Tanto es así que en la actualidad existen diversos permisos de investigación para sustancias metálicas en nuestra región, entre los que destacan, por su número, los solicitados para oro y que se sitúan esencialmente en tres sectores: Pola de Allande, Belmonte-Salas y Tapia de Casariego. También es oportuno señalar, por su relación directa con sustancias incluidas en el listado de materias primas críticas, los derechos mineros existentes en el entorno de Boal para la búsqueda de wolframio, así como los de las áreas del Aramo y de Cabrales para cobalto. Por otra parte, en el proyecto de investigación titulado «Valoración de la influencia de minería histórica, industria y geología en los niveles de fondo geoquímicos de sedimentos FLUVIALES y COSTEROS y sus implicaciones de riesgo» (FLUCOS), que está siendo desarrollado por el grupo de investigación ISYMA de la Universidad de Oviedo, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, se han encontrado interesantes indicios de oro y monacita (mineral que contiene tierras raras) en los sedimentos de la cuenca del río Esva (González-Nistal *et al.*, 2020).

La siguiente figura muestra los indicios minerales más importantes de Asturias, agrupados por tipo de sustancia (A) y se señalan las zonas en las que actualmente existen permisos de exploración (B).

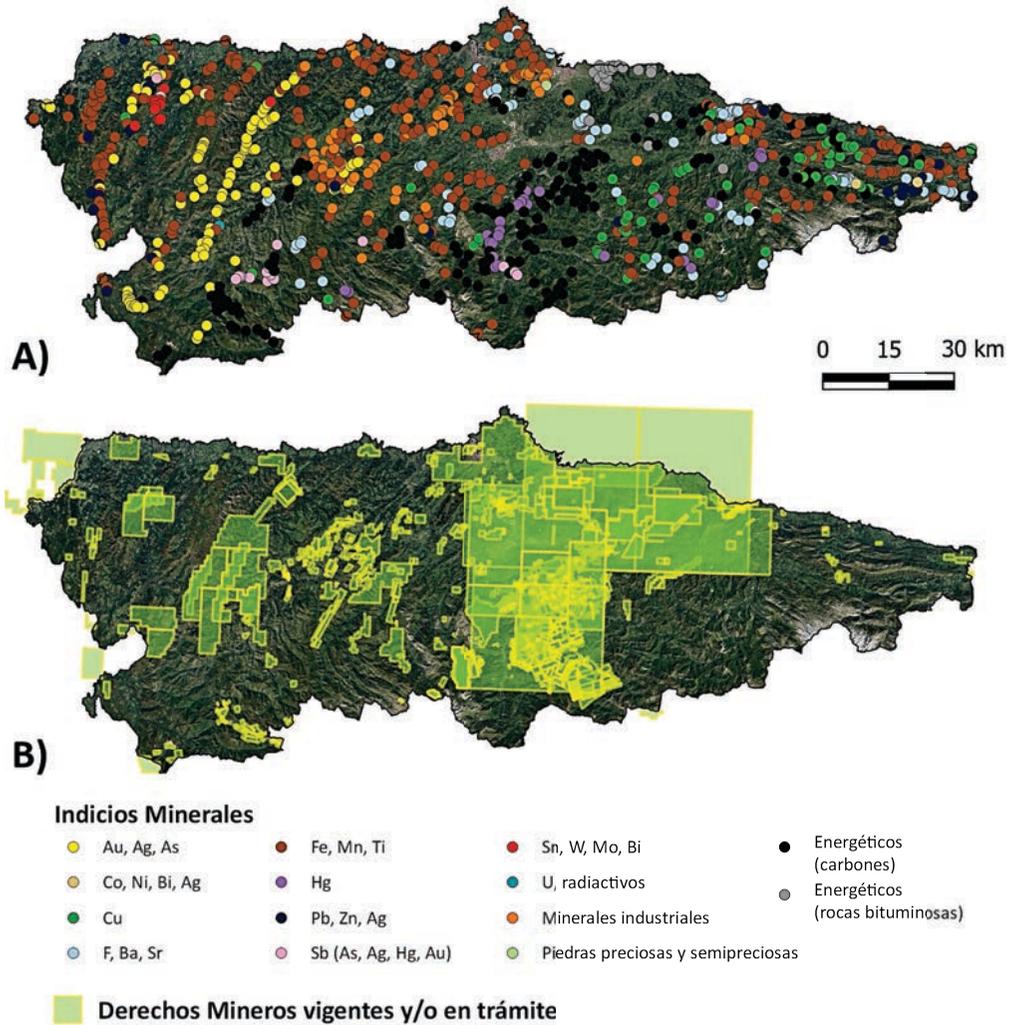


Figura 1. A) Indicios minerales (IGME, 2015); B) Derechos mineros activos en Asturias (MITECO, 2022a)

La ley 22/1973 (o «Ley de Minas») establece, en su artículo tercero, cuatro secciones en la ordenación jurídica de los recursos geológicos. La primera de estas secciones engloba los recursos (lit.) «cuyo aprovechamiento único sea el de obtener fragmentos de tamaño y forma apropiados para su utilización directa en obras de infraestructura, construcción y otros usos que no exigen más operaciones que las de arranque, quebrantado y calibrado», es decir, lo que se conoce coloquialmente como «áridos». En este caso se trata de materiales sin limitaciones físicas o químicas restrictivas, que se consumen en grandes cantidades, y cuyo beneficio tiene lugar en explotaciones cercanas a los centros de consumo, siendo, por su número, difíciles de representar exhaustivamente (no se incluyen en la Figura 1A). En la sección segunda estaría incluido el recurso geológico más esencial de todos: las aguas minerales (y las aguas termales), que obviamente no se representan en dicha figura, ni tampoco los recursos hídricos en sentido amplio. En la sección tercera se incluyen las sustancias representadas en la figura anterior. La cuarta y última sección de

recursos geológicos engloba a las sustancias beneficiadas para la producción de energía; entre estas y de forma explícita, se citan los recursos geotérmicos. En términos relativos, y respecto al resto de España, los recursos hídricos (y los geotérmicos) resultan de gran relevancia en la región y en ellos se centrará esta lección.



Recursos hídricos

«*El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza*» (Leonardo Da Vinci, c. 1500)

En este apartado se harán algunas consideraciones preliminares sobre la importancia histórica del agua y la Hidrogeología, el origen y posibilidades de aprovechamiento del agua subterránea en nuestra región y la necesidad de gestionar adecuadamente este recurso.

2.1. Agua, fuente de vida

El crecimiento de la población, la rápida urbanización y el desarrollo económico son solo algunos de los factores que impulsan el aumento de la demanda de agua, energía y alimentos. La agricultura es el mayor consumidor de recursos de agua dulce. Para alimentar a una población mundial que se proyecta alcanzará los 9.000 millones de personas en 2050, la producción de alimentos deberá aumentar en un 60% (ONU, 2022). La demanda de agua se incrementa a un ritmo todavía superior al crecimiento demográfico. *Necesitamos agua para vivir.*

Desde la civilización griega hasta el Renacimiento, se han considerado cuatro elementos fundamentales en la naturaleza: agua, aire, tierra y fuego, pero es el primero el que ha representado un papel vital en el desarrollo de las civilizaciones, que se han asentado siempre donde el abastecimiento estuviera asegurado. El agua es considerada *fuentes de vida*, resulta necesaria para engendrarla y esta no es posible sin aquella. Al mismo tiempo, el agua ha desempeñado un rol primordial en la cultura popular, atribuyéndole propiedades curativas y purificadoras. También se le ha otorgado la capacidad de proporcionar vitalidad, al estar constituidos todos los organismos, en un elevado porcentaje, de agua. Igualmente, el agua es regeneradora al formar parte de un ciclo que moldea aquello que encuentra a su paso y retorna todas las cosas a su estado original. Notable

también es su significado religioso, que en algunos casos llega a tener incluso connotaciones mágicas y misteriosas, siendo protagonista de numerosas leyendas y acontecimientos históricos. Esta veneración abarca tanto a las aguas superficiales (como es el caso del río Ganges) como a las subterráneas (el dios Airón, vinculado a aguas profundas y arraigado en Hispania desde antes de la conquista romana, se consideraba el dios de la vida y en España hay más de 100 topónimos con su nombre relacionados con pozos, cuevas, fuentes, etc.). En la cultura cristiana, «agua» es una palabra cargada de simbolismo y una de las más aludidas en la Biblia, la cual se abre con las aguas del Génesis y se cierra, en el último capítulo del Apocalipsis, con un río en la ciudad; el agua representa vida, purificación (bautismo), esperanza y sabiduría divina (Bruni, 2021): *«el que beba del agua que yo le dé, no tendrá sed jamás, sino que el agua que yo le dé se convertirá en él en fuente de agua que brota para vida eterna»* (Juan, 4:14). En la mitología asturiana, la Xana es la ninfa de las aguas, que vive en las fuentes y representa la bondad de la Naturaleza: *«Nos es común la fuente donde mora la xana»*. En el folklore asturiano se usa el término *«la flor del agua»* para representar la quinta esencia, el agua pura del amanecer, que no ha sido contaminada por el contacto con la boca del hombre o los animales y simboliza también el amor:

*«Lleváronme la neña que más amaba
y también me llevaron la flor del agua».*

Ambos mitos se relacionan a menudo con la noche de San Juan (Hevia, 1973).

2.2. Referencias culturales. Agua y (pre) románico en Asturias

En la Península Ibérica es durante el románico – tendencia artística de influencia cristiana que tuvo su esplendor en Europa durante los s. XI y XII – cuando muchos de los edificios religiosos adquieren una vinculación muy estrecha con el agua. El románico es un arte eminentemente simbólico, en el que lo sagrado convive con lo profano. Esta armonía tiene lugar en las representaciones artísticas, en la distribución de las construcciones y también en el lugar en que se enclavan. Por un lado, la localización de los monasterios medievales junto a manantiales tiene un evidente sentido práctico, ya que las comunidades religiosas la necesitaban tanto para su higiene y abastecimiento como para las actividades agrícolas y ganaderas que desarrollaban. Por otra parte, no resulta aventurado atribuir su ubicación al fin de cristianizar un lugar de culto pagano previo, ya que los puntos de surgencia de agua siempre han estado rodeados de misterio, mitología y simbolismo, llevándose a cabo en los mismos prácticas paganas y rituales mágicos. Algunos edificios cristianos fueron levantados en dichos lugares de culto y otros sobre las propias surgencias de agua (Linares, 2013).

Existen algunas fuentes vinculadas a edificios del prerrománico y románico asturiano. Destaca la *f fuente Foncalada* situada en el centro de Oviedo, mandada construir por el rey Alfonso III durante la primera mitad del siglo IX, según un estudio realizado de sus inscripciones. Se trata del monumento civil en uso continuado más antiguo de España y el único ejemplo conservado de su clase del arte prerrománico en Asturias. Las fuentes románicas tienen una arquitectura sencilla y de escasa decoración (suelen ser pequeños edificios abovedados, abiertos mediante uno o dos arcos de medio punto). También se pueden citar la *f fuente de El Matoxo*, que abastecía al monasterio románico de Santa María la Real de Obona (Tineo), punto clave histórico del Camino de Santiago, así como las *f fuentes de Ules y de Los Pastores*, próximas a los edificios prerrománicos del monte Naranco (Santa María del Naranco y San Miguel de Lillo) en Oviedo. También se incluye el *manantial Santi*, próximo al monasterio de Santa María de Valdediós y la iglesia o «Conventín» de San Salvador de Valdediós (prerrománico) en Villaviciosa.

Estas cinco fuentes poseen un rasgo histórico común, ya que han condicionado, probablemente, un primer lugar de culto pagano y luego cristiano, asociándose a los principales monumentos (pre)románicos de Asturias. Hidrogeológicamente difieren en sus características, ya que tres de ellas (Ules, Foncalada y Santi) drenan acuíferos carbonatados de edades y litofacias diferentes y las otras dos, conjuntos detríticos, también diferentes entre sí (pizarras en el caso de El Matoxo y areniscas en la fuente de Los Pastores). Todas ellas poseen bajo grado de mineralización y caudales medios variados, desde 0,04 a más de 4 l/s, pero nunca se secan, lo que demuestra que en la época de construcción de estos edificios (s. VIII-XIII), pese a que se desconocen los condicionantes climáticos, no se precisaban grandes cantidades de agua, pero sí que estas fueran fiables a lo largo del año. Pese a su relevancia y a formar parte del patrimonio histórico, algunas de estas fuentes se encuentran en estado de abandono; no existe en ellas ningún panel informativo que deje constancia de su historia (salvo en la Fuente de Foncalada), ni de sus principales características hidrogeológicas y generalmente no se usan o tienen un uso menor, estando en algunos casos contaminadas por actividad antrópica.

Este es el caso del manantial de El Matoxo, que presenta coliformes fecales, lo que impide su consumo y que probablemente se debe a la lixiviación de residuos ganaderos en fincas a cotas superiores, en su área de recarga. Se trata de un agua ligeramente ácida, con trazas de hierro y zinc, blanda, de mineralización débil y de facies clorurada-sódica. Esta fuente obtuvo su fama gracias a que su agua era la única que consumía *fray Benito Jerónimo Feijoo Montenegro*, ilustre pensador y teólogo, profesor de la *Universidad de Oviedo* en el s. XVIII, que pasaba largas temporadas de descanso en el monasterio de Santa María la Real de Obona, declarado Monumento Nacional. Este cenobio posee gran importancia histórica por ser desde 1222 paso obligado para los peregrinos que se dirigían a Compostela por el «Camino Primitivo», y el cual se abastecía del agua de dicha fuente. Obona (etimológicamente Oubona, Aubona, «agua-buena») fue un centro cultural y económico de primer orden, y por ella pasó gente de toda condición. De aquí procede la más antigua referencia explícita en territorio astur a la «sidra», refiriéndose a la comida y bebida dada a los siervos que trabajaban en el monasterio los días acordados: «*en el día que fueren llamados a prestar servicio, tengan ración de comida y bebida, a saber: Libra y cuarto de pan de mijo o de otro y porción de habas o de otro comestible, y sidra pudiendo ser*» (*et sicere si potest ese*) (De la Fuente, 2011). Cuando residía en Oviedo, el Padre Feijoo hacía traer agua desde Obona en recipientes debidamente precintados para garantizar su autenticidad, en un pollino cargado con dos cántaros cerrados con doble llave, no fuese que por el camino - dos días largos - al arriero le diese por aligerar la carga (Bello, 1997). Una de las llaves se la quedaba el cirujano Fray Valentín Calviño en Obona y la otra la custodiaba el propio Feijoo (De la Fuente, 2011).

El padre Feijoo realiza la encomiable tarea de propagar la idea de que las aguas pueden ser un valioso recurso terapéutico (Pérez-Bustamante, 2015) y la importancia que concedió al agua de Obona fue tal que aseguraba ser capaz de distinguirla por el tacto: «*De esta percepción de la delgadez del agua por el tacto (que algunos han dificultado mucho) tengo sobradas experiencias. El P. Fr. Benito de Arenas, hijo del monasterio de San Salvador de Oña, que los años pasados, siendo Cursantes en este Colegio, me asistía en la Celda, puede testificar, que usando yo siempre de dos aguas distintas, igualmente cristalina, y pura una que otra, una para beber, que se me conducía de una fuente muy distante, y otra para lavar, en una ocasión, que me presentó en el vernegal, para lavarme, la que usaba para beber, al punto que entré las manos en ella lo conocí, y se lo dije. Lo que se llama ser el agua delgada, o gruesa, no es otra cosa, como ya advertimos en otra parte, que ser más, o menos adherentes unas a otras sus partículas. Cuanto menos adherentes son, menos resisten al tacto, y menos impresión hacen en él, por su mayor facilidad en dividirse. Es verdad, que no todos percibirán esta desigualdad en resistir al tacto entre diferentes aguas, lo que no juzgo consiste en la torpeza del tacto, sino la del sentido co-*

mún». De esta agua bebió el padre Feijoo hasta que murió a los casi 88 años en Oviedo. Este manantial se ubica a unos 100 m al norte de la Iglesia del Monasterio y el agua, con gran probabilidad, estaba canalizada siguiendo un trazado que se ha inferido desde la fuente hasta el monasterio. Una vez allí, se utilizaba para las distintas labores cotidianas de los monjes (Álvarez, 2017). En la actualidad se encuentra en estado de abandono, el agua mana a través de una fractura de la roca y no dispone de grifo ni pilón.

2.3. El agua subterránea

En ingeniería son muy importantes los datos; las interpretaciones de los mismos pueden dar lugar a discusión, pero los datos por sí mismos son objetivos. Comencemos, pues, con los números que nos sirven para fijar el escenario de la distribución del agua a escala global: el volumen de agua circulante en el ciclo hidrológico global se estima en $1,38 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$ y es por todos bien conocido que más del 70% de la superficie del planeta está cubierta por agua. Pese a que el planeta Tierra se denomina el «planeta azul» por su abundancia de agua, los recursos disponibles no son tan elevados como podría parecer. La mayor parte de este volumen (un 97,5% del total), almacenado en los océanos, es agua salada. Del 2,5% restante, más de dos tercios tampoco resulta aprovechable como recurso, ya que se encuentra congelada en los casquetes polares o como aguas profundas inaccesibles. El exíguo porcentaje restante constituye el agua dulce en estado líquido del planeta (almacenada en acuíferos, ríos, lagos, humedales, biomasa, vapor de la atmósfera, etc.) aunque de este, la mayor parte (96%) se encuentra almacenada en las rocas del subsuelo, y es lo que se conoce coloquialmente como «agua subterránea» (Martínez-Santos, 2018). No se corresponde, desde luego, su modesta importancia cuantitativa a nivel global, con el servicio que presta a la sociedad: además de alimentar a las aguas superficiales, en torno a un 50% del agua que bebemos y el 43% del agua utilizada para riego es de origen subterráneo (ONU, 2022), lo que contribuye decisivamente en la erradicación de hambrunas en algunos países. *La vida no sería posible sin las aguas subterráneas.*

El agua subterránea pasa inadvertida bajo nuestros pies, se nos antoja invisible, pero podemos apreciar constantemente sus efectos, *como un tesoro oculto*. Representa la base del suministro de agua potable y es fundamental para la agricultura, la industria y el funcionamiento de los ecosistemas. Además de alimentar a los manantiales, el agua subterránea mantiene el caudal base de muchos ríos (ríos ganadores como son, en general, los asturianos, que no se secan aunque no llueva), la vegetación de ribera y la fauna, limita las inundaciones en picos de tormenta, dando resiliencia al sistema conjunto de aguas superficiales-subterráneas y es soporte de muchos de los ecosistemas acuáticos y humedales. Los ríos no son simples canales, sino que dependen de la interacción con el agua subterránea, que diluye el agua de escorrentía, amortigua los cambios de temperatura, reduce la contaminación, favorece el desarrollo de biofilms y en definitiva la vida (Carrera, 2018). Las aguas subterráneas son de disponibilidad casi inmediata, técnicamente de fácil acceso y de bajo coste económico de explotación. Sin ellas es difícil, e incluso imposible, garantizar el suministro y las dotaciones necesarias cuando la escasez y la sequía merman los recursos de aguas superficiales disponibles. En las zonas más áridas, pueden ser la única fuente de agua al alcance de la población y en muchos casos se trata de un recurso poco estudiado y reconocido.

Las aguas subterráneas se encuentran en los *acuíferos*, que son formaciones geológicas que contienen suficiente material permeable saturado (capaz de almacenar y transmitir agua) para proporcionar cantidades significativas de agua a manantiales y obras de captación. Su principal fuente de recarga es la lluvia que se infiltra en su área aflorante; en su interior el agua se desplaza lentamente hacia sus zonas de descarga naturales (ma-

nantiales, ríos, mares, con frecuencia mediante descargas difusas) o bien es extraída mediante el bombeo en pozos (IGME, 2001). Los *manantiales* son los aliviaderos o rebosaderos naturales de los sistemas acuíferos, que se producen cuando el nivel piezométrico intercepta la superficie topográfica, dando lugar a un fenómeno de surgencia. La tipología de los manantiales es variada y pueden atribuirse a causas tectónicas (fallas), litoestratigráficas (contacto con materiales poco permeables) o geomorfológicas (depresión topográfica), entre otras. Cuando el agua almacenada en un acuífero está en contacto con la atmósfera, a través de los poros de la roca, este se denomina *acuífero libre* y el límite superior de la zona saturada se conoce como *nivel freático*. Si el acuífero está total o parcialmente aislado de la atmósfera por materiales geológicos de baja *permeabilidad* (o conductividad hidráulica), el acuífero se denomina *confinado* y al perforar un sondeo en él, el agua asciende en su interior hasta alcanzar un equilibrio entre la presión a la que se encuentra sometido y la presión atmosférica, definiendo la cota del *nivel piezométrico* (Martínez-Santos, 2018). A este fenómeno se le conoce como *artesianismo*, porque los primeros pozos artesianos conocidos fueron perforados en el departamento francés de Artois por los frailes cartujos en el siglo XII. En ocasiones la presión a la que está sometida el agua en el acuífero confinado es suficiente para que el agua ascienda por encima de la superficie topográfica (pozo surgente). En la región de París existen numerosos pozos artesianos perforados en un acuífero arenoso y en los que el agua llega a alcanzar una elevación de 40 m, lo que equivale a una presión de 4 atmósferas (Hevia, 1973).

El uso de las aguas subterráneas no está exento de limitaciones, ya que se trata de un bien finito que no siempre está disponible en cantidad y calidad suficiente en los lugares con mayor demanda de agua. Al extraer las aguas subterráneas se explota una reserva grande, pero no ilimitada. En última instancia, su sostenibilidad depende de equilibrar el ritmo medio de extracción con el de recarga; si la cantidad extraída cada año no excede de esta aportación se podrá continuar indefinidamente sacando al mismo ritmo, porque, aunque descienda puntualmente el nivel piezométrico, en otra época del año se recuperará, manteniendo un equilibrio anual. En este sentido, se definen los *recursos* de un acuífero como el flujo de agua que en cada periodo de tiempo (por ejemplo, un año hidrológico medio) entra y sale del mismo; se trata del volumen de agua disponible en este tiempo. Por otra parte, las *reservas* del acuífero serían el volumen de agua almacenado en el mismo en un instante determinado y que se considera, para periodos largos de tiempo, y en condiciones ordinarias, prácticamente constante. En algunas regiones áridas, los acuíferos contienen agua infiltrada hace miles de años, cuando el clima del lugar era más húmedo, de modo que la tasa de recuperación actual es muy reducida. Con frecuencia, se dice que explotar estas aguas es «extraer agua fósil», para subrayar que el recurso acabará por agotarse cualquiera que sea el ritmo de extracción. El hidrogeólogo A. Cornet, de mediados del siglo pasado, compara los recursos con la «renta» y las reservas con el «capital» y afirma que «*lo normal es utilizar la renta pero que sería imprudente consumir el capital*». No obstante, no habría inconveniente en explotar acuíferos más allá de su gasto normal si se tiene la certeza de que la reserva puede recuperarse de un modo natural, en época de lluvias, por ejemplo, o bien artificialmente por realimentación o inyección. En esto consiste la capacidad de *regulación* del acuífero.

Hasta hace poco tiempo, la producción de agua de los sondeos verticales perforados en rocas verticalizadas era limitada porque estos atravesaban un espesor de serie limitado a unos pocos metros del total. Con la perforación dirigida (sondeos inclinados) es posible atravesar un espesor de serie muy superior, seleccionar los niveles más productivos y permeables (fracturados o karstificados), conseguir caudales muy superiores y por tanto una mejor regulación de los sistemas hidrogeológicos. Esto consiste en utilizar la capacidad de los reservorios geológicos para mejorar la regulación hídrica y la garantía de suministro, almacenar recursos para cuando se necesiten, aprovechando los acuíferos como verdaderos embalses subterráneos naturales. Se puede así, contrariamente a

lo que sucede con los embalses de aguas superficiales, sin grandes inversiones, pozo a pozo, incrementar la capacidad de regulación de la región. Además, las inversiones se pueden diferir en el tiempo en función de la evolución de la demanda.

Las consecuencias de la *sobreexplotación de las aguas subterráneas* pueden ser, entre otras, la disminución de las reservas y agotamiento de los acuíferos (descenso general de los niveles piezométricos, lo que puede suponer un mayor coste de extracción del agua en pozos, que se sequen manantiales y humedales, una disminución de las masas de agua superficial, etc.), así como *subsistencia* (hundimiento del terreno), *intrusión salina* (contaminación de los acuíferos costeros con agua salada) y variados efectos ecológicos. En España en torno al 60% de los acuíferos costeros registran problemas de intrusión salina, que se considera generalizada en el 20% de los casos, siendo el litoral mediterráneo y las islas las zonas más afectadas (Jiménez, 2019). Según palabras del ingeniero de minas asturiano T. Hevia (1973): «*Los mantos de agua subterránea son pues una riqueza que tenemos a nuestra disposición pero como toda riqueza hay que procurar no dilapidarla sino administrarla, gastarla prudentemente a fin de que no se nos agote y por ello conviene medirla para determinar qué cantidad podemos gastar cada año*».

En cuanto a la calidad, en general, se puede aceptar que la del agua subterránea es mejor que la del agua superficial, dado que está mucho menos expuesta a la acción humana, aunque la actividad antrópica puede afectarla también, como es el caso del uso de fertilizantes y pesticidas en la agricultura, que constituye una grave amenaza (los nitratos contaminan con frecuencia los recursos de agua subterránea en todo el mundo) o las altas concentraciones de amonio que alcanzan algunas aguas subterráneas procedentes de vertidos directos de aguas residuales o a consecuencia de deficiencias en las redes de saneamiento. Según un reciente informe de la Agencia Europea de Medioambiente, el 74% de las aguas subterráneas en la UE ha alcanzado el buen estado químico (en contraste con el 38% de las aguas superficiales). Este objetivo no se cumple en algunos acuíferos debido principalmente a la contaminación por escorrentía agrícola, a la intrusión salina y a la infiltración de sustancias químicas peligrosas desde emplazamientos contaminados (Jiménez, 2019). Para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) fijados para 2030 por las Naciones Unidas, es imprescindible una buena gestión de las aguas subterráneas. De las 169 metas de los ODS, 53 guardan relación con este recurso y España suspende en algunos de ellos (ONU, 2022). La UE pretende reducir a la mitad la contaminación por exceso de nutrientes de cara a 2030.

En España se registran en muchos acuíferos elevadas concentraciones de plaguicidas y nitratos (estos se asocian principalmente a usos agrícolas y cultivos bajo plástico por el uso de fertilizantes, pero también influye el estiércol ganadero). En 2018 la UE abrió un expediente sancionador contra España por no cumplir con la Directiva sobre nitratos y en 2021 le dio un ultimátum para elevar el caso ante el Tribunal de Justicia de la UE. El Ministerio para la Transición Ecológica reconoció que solo 693 de los 1.235 puntos que registran exceso de nitratos alcanzarán un buen estado antes de 2027, año límite impuesto por la normativa europea. El 23% de las masas de agua subterránea están contaminadas por nitratos y se estima que casi el 40% estará contaminado en 2039. Las zonas más afectadas por la concentración de nitratos se sitúan principalmente en las cuencas del Duero y del Ebro, Comunidad Valenciana, el Mar Menor y regiones de intensa actividad agrícola, como las provincias de Almería o Huelva (Oria, 2021).

Por otra parte, las aguas subterráneas desempeñarán un papel fundamental en la adaptación al *cambio climático*. Los resultados del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) y otros centros de investigación no son optimistas. Prevén que habrá una reducción paulatina de las aportaciones hídricas a lo largo del s. XXI y que los recursos renovables de aguas subterráneas pueden verse disminuidos hasta en un 20%,

según el escenario considerado y la zona en concreto (Jiménez-Cisneros *et al.*, 2014). Si se considera un escenario futuro en el que las temperaturas suban y las precipitaciones sean más escasas y también más irregulares, los impactos previsibles sobre las aguas subterráneas serían importantes, pero también serían menos drásticos que los que existirían sobre las aguas superficiales. La recarga de los acuíferos depende, en última instancia, de dos factores: de la precipitación y de la suma de los fenómenos de evaporación y transpiración (pérdida de agua hacia la atmósfera). Si la precipitación es menor, el agua que alimenta los acuíferos será también menor, y el aumento de la temperatura llevará a una mayor demanda y también a una mayor pérdida por evapotranspiración. La consecuencia, no inmediata, pero sí esperable en el corto-medio plazo, es un descenso del nivel de los acuíferos. La incidencia esperable entonces es la desaparición de algunos manantiales, sobre todo aquellos localizados a mayor cota. Algunos ríos, o tramos de ríos, podrían pasar de ser ganadores a ser perdedores, con la consiguiente pérdida de caudal, que dejarían de recibir del acuífero. Esto podría afectar, de forma subsidiaria, a los ecosistemas relacionados con los medios anteriores. En todo caso, las consecuencias siempre serían más amortiguadas y lejanas en el tiempo que las que cabría esperar sobre las aguas superficiales, ya que las aguas subterráneas ofrecen un suministro más continuado y resistente a las variaciones climáticas. Los cambios del régimen de precipitaciones no se perciben en los acuíferos a corto plazo porque las aguas están «almacenadas» y su papel en futuros escenarios será crítico para mejorar la regulación y garantía de suministro, constituyendo *un recurso estratégico. Resulta preciso gestionar de forma sostenible este preciado recurso, pero no se puede gestionar lo que no se mide. De ahí la necesidad de monitorizar y estudiar exhaustivamente las aguas subterráneas.*

2.4. De los albores de la ciencia a la Hidrogeología moderna

La Hidrogeología o Hidrología subterránea se puede definir como la *ciencia que estudia el origen y formación del agua subterránea, las formas en las que se dispone, su movimiento, régimen y reservas, su interacción con el suelo y las rocas, sus características físicas, químicas y biológicas y las condiciones que determinan su aprovechamiento y regulación.* No se corresponde la importancia del agua subterránea con el desarrollo que la Hidrogeología ha tenido como ciencia. Resulta curioso, si se tienen en cuenta, por ejemplo, los antecedentes de las grandes obras de ingeniería hidráulica de época romana, que no sea hasta bien entrado el siglo XVI cuando un célebre alfarero francés, Bernard Palissy, por primera vez sugiere que el origen del agua subterránea se relaciona con la infiltración de agua de lluvia en el terreno: «*Es la lluvia al caer sobre las montañas la que alimenta sus fuentes*» y «*Las aguas de lluvia se infiltran hasta un nivel impermeable, en cuyo punto más bajo surgen; luego regresarán a la atmósfera...*», pese a su origen humilde: «*No he tenido nunca otros libros que el cielo y la tierra, cuyas páginas están abiertas a todos*». En un principio, la ciencia se centró exclusivamente en la búsqueda y explotación de las aguas subterráneas, pero con el incremento de la demanda hídrica debido al mayor nivel de desarrollo, el crecimiento demográfico y la percepción de la pérdida de calidad del agua, y ante la perspectiva de potencial escasez, surge la necesidad de un mejor conocimiento, así como la planificación y gestión adecuada de los recursos hídricos, por lo que se han ido desarrollado nuevas facetas en el ámbito de la Hidrogeología.

Todas las civilizaciones han tratado de explicar el origen de ríos y manantiales (Libro del Eclesiastés, Antiguo Testamento: «*Los ríos van al mar, y la mar no se llena; allá de donde vinieron tornan de nuevo, para volver a correr*»), pero el ciclo del agua no se interpretó correctamente hasta el s. XVI (Martínez-Gil, 1972). Las antiguas civilizaciones explotaban aguas superficiales (ríos Tigris y Eufrates en Mesopotamia y Nilo en Egipto) y subterráneas, por ejemplo, mediante los *qanats*, de origen persa y tecnología depurada, que se extendieron por el mundo civilizado (en España se conservan bastantes) e incluso acti-

vos hoy, cuya construcción implica un conocimiento del funcionamiento de los acuíferos. Consisten en galerías horizontales de gran longitud y cierta pendiente, a lo largo de las cuales se sitúan pozos de extracción para permitir el acceso al agua sin tener que llegar hasta la boca de la galería, sirviendo a la vez de sistema de ventilación durante su construcción. En la antigua Grecia, quizá por la abundancia de fenómenos kársticos (huecos formados por disolución en rocas carbonatadas como la caliza) se cree generalizada la existencia de grandes cavernas y el ciclo del agua se interpreta «al revés»: el agua penetra en la corteza desde el fondo de los océanos, se almacena en profundidad (cavernas) y asciende por el calor de la Tierra hasta las montañas para surgir como manantiales en las zonas de nacimiento de los ríos, proceso durante el cual el agua marina se purifica, perdiendo su salinidad; esta teoría equivocada se mantendría durante muchos siglos. Los romanos realizaron grandes obras de ingeniería para conducir el agua, prestaron especial interés a las aguas termales (balnearios) y, como grandes mineros, desarrollaron técnicas para desaguar sus explotaciones. En la Edad Media, se heredaron las teorías clásicas y hubo pobres contribuciones, salvo dos honrosas excepciones: Leonardo Da Vinci («*Así como del estanque de sangre provienen las venas cuyas ramas se extienden a través del cuerpo humano, así el océano llena el cuerpo de la tierra con un número infinito de venas acuosas...*») y Bernard Palissy, ya mencionado.

A mediados del s. XVI comienzan a aparecer las primeras teorías modernas, basadas en la observación directa de los fenómenos, sobre aspectos parciales del ciclo del agua; estas ideas, como casi todas las pioneras en los diferentes campos del saber, no fueron originalmente bien recibidas por la comunidad científica, pero sirvieron como punto de partida a otros avances interesantes a lo largo del siglo XVII. En este momento se pasa de lo cualitativo a lo cuantitativo, se inicia la hidrología empírica, basando sus ideas en medidas, en lugar de en especulaciones. Destacan tres figuras: 1) Pierre Perrault, que fue el primero en cuantificar las precipitaciones y pudo determinar que «*el volumen total anual de agua transportada por el río Sena representa únicamente la sexta parte del volumen anual de precipitaciones*»; 2) Edme Mariotte, que también hizo el balance hídrico del Sena, midió la infiltración y relacionó el caudal los manantiales con las precipitaciones; 3) Edmond Halley (no solamente famoso por haber calculado la órbita del cometa que lleva su nombre), quien realizó los primeros experimentos documentados para estimar la evaporación: «*El volumen de agua evaporado un día de verano del Mediterráneo es superior al volumen de agua que recibe de todos los ríos que llegan a él*» (se trata de un balance impreciso porque no considera las entradas desde el Atlántico, pero hizo patente que el agua evaporada en el mar es superior a la precipitación).

Entre los s. XVII y XIX, otros científicos dieron un impulso a la Hidrología con sus descubrimientos, como el barómetro (Torricelli), el pluviómetro (Castelli) o los métodos para medir la velocidad del agua en un río, como el tubo de Pitot o el molinete (Woltman). También fue decisivo el desarrollo de otras ciencias como la Química (en el s. XIX se conoce la composición de la molécula de agua) o la Geología. Los primeros conocimientos geológicos significativos se obtuvieron durante los s. XVIII y XIX, sentando así las bases para comprender el movimiento de las aguas subterráneas.

Merece una mención especial el ingeniero hidráulico francés Henry Darcy (s. XIX), ya que la ley empírica que obtuvo y que lleva su nombre, constituye la base del movimiento del agua subterránea (hidrodinámica) y la piedra angular de disciplinas como la Hidrogeología y la prospección de petróleo. *En 1912 se imparte la Hidrología como disciplina universitaria por primera vez.* A partir de los años 30 se produce un avance importante y surge la Hidrogeología moderna. Figuras destacadas como Dupuit, Forchheimer y Thiem, establecieron las leyes de flujo en régimen permanente. Boussinesq, Theis y Jacob, entre otros, desarrollaron las leyes de flujo en régimen transitorio. También despegó la Hidroquímica (Schoeller, Piper, etc.), la aplicación del uso de isótopos como trazado-

res, así como las técnicas de prospección y de captación (técnicas geofísicas, sensores remotos, fotointerpretación, GIS, técnicas de perforación y bombeo, etc.). Como en otras muchas disciplinas, las herramientas informáticas supusieron un gran cambio, especialmente para modelización y simulación. En el s. XX cobra importancia la gestión conjunta de aguas superficiales y subterráneas (recarga artificial, regulación de embalses subterráneos, etc.). Si algo caracteriza a la Hidrogeología es su faceta multidisciplinar, ya que posee relación con otros muchos campos (Geología, Química, Matemáticas, Meteorología, Economía, Hidráulica, Estadística, Medioambiente, etc.).

En España, se puede destacar la figura de H. Bentabol, ingeniero de minas y abogado, autor del famoso libro «Las Aguas de España y Portugal» (1897), quien tenía claro que no había ríos subterráneos sino aguas subterráneas y afirmaba: «*La característica útil de las aguas subterráneas es su escasa velocidad que, aunque muy variable queda generalmente muy por debajo de la que anima a las corrientes superficiales*», exponiendo como ejemplo que en el valle del Besós, aguas caídas a 40 km del mar estarían superficialmente en el mismo a los dos días, mientras que subterráneamente tardarían 27 años, es decir que circulan 5000 veces más despacio. También atribuye a los españoles la invención de la desalación de agua de mar en 1566 y el aprovechamiento higiénico de las aguas fecales. Los descubrimientos científicos en Hidrogeología alcanzados en USA en los años 20 y 30 del pasado siglo, no llegaron a nuestro país hasta los 60. Con el impulso de la Ley de Hidrocarburos de 1956, la llegada a España de numerosas compañías de exploración petrolífera y el desarrollo en técnicas de perforación y exploración (como la Geofísica), en conjunción con el despegue del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la creación de varias facultades de Ciencias Geológicas, hubo un salto hacia adelante en el conocimiento de los sistemas hidrogeológicos del país, que quedó plasmado en destacados estudios a nivel nacional. Posteriormente, se fueron popularizando los modelos en diferencias finitas que cedieron paso a los elementos finitos y más recientemente, se desarrollaron los estudios de contaminación de acuíferos y de gestión conjunta de aguas superficiales y subterráneas (IGME, 2013).

Cabe hacer notar que la necesidad obligó a la industria minera a extraer el agua de las minas. Por otra parte, en el tratamiento del todo uno extraído en plantas mineralúrgicas y posteriormente en la metalurgia de las menas para la obtención de los metales, siempre se ha utilizado gran cantidad de agua. Hubo que prestar especial atención a la calidad de la misma tanto para su uso en refrigeración de hornos o calderas en la industria termoelectrónica de finales del s. XIX como para su vertido a cauces públicos. *Los ingenieros de minas siempre han estado en contacto con el agua subterránea y desde la infancia de la Hidrogeología como ciencia, han debido aplicar sus leyes. De hecho, muchos hidrogeólogos ilustres europeos han estado ligados a Escuelas de minas, como las de París, Freiberg, e incluso Oviedo y Madrid.*

2.5. Recursos hidrogeológicos de Asturias

El Dr. Gaspar Casal, médico de la Santa Iglesia Catedral de Oviedo (primero en describir el «mal de la rosa» o pelagra) afirmaba en 1762: «*Como son tantos los montes, eminencias y collados en este Principado de Asturias; son casi innumerables las fuentes y manantiales de agua*».

Asturias difiere de otras comunidades españolas en una doble vertiente: por un lado, es una región dotada de abundantes recursos de agua subterránea, debido a su favorable geología, como se verá más adelante, y a las generosas precipitaciones que proveen la recarga de los acuíferos. Por otra parte, y quizá debido a esa relativa riqueza, no existe en Asturias tradición de explotación de las aguas subterráneas y dichos recursos están

infrautilizados y, lo que es peor, poco estudiados. El ingeniero de minas Juan González Montero decía en 1965 en su libro «Una riqueza nacional latente; las aguas subterráneas» lo siguiente:

«Si nos dijeran que debajo de nuestro suelo y a escasa profundidad existían diseminados por todo el país gran cantidad de aljibes de diversas capacidades, pero todos ellos de grandes dimensiones, y que normalmente distaban unos de otros pocos kilómetros, indudablemente y antes de pensar en construir un nuevo depósito regulador más, trataríamos de localizar alguno de ellos que estuviera suficientemente cerca del punto donde se planteará su necesidad. Si nos dijeran que estos depósitos habían sido provistos de un sistema de filtraje y depuración de eficacia superior a todo lo concebido hasta ahora y que habían sido construidos tan a conciencia que no tenían problema de pérdida por evaporación ni contaminación por agentes externos y que su aislamiento térmico era tal que el agua contenida en ellos se mantenía, tanto en invierno como en verano en la temperatura óptima para su consumo, diríamos que no tenemos perdón si no procuráramos localizando uno a uno todos esos maravillosos depósitos, antes de gastar una peseta más en solucionar de otra forma nuestros problemas de abastecimiento. Si, además, nos garantizaran que aún en caso de sequía extrema siempre tenían alguna aportación de agua, probablemente la opinión pública diría que es intolerable que después de tantos años de conocer su existencia, no los hubiéramos localizado ya de una vez todos ellos, en lugar de disertar sobre su existencia y propiedades admirables».

A diferencia de otras regiones españolas, Asturias tiene la asignatura pendiente de conocer mejor sus recursos hidrogeológicos. Aproximadamente, nuestra región cuenta con unas reservas de más de 6000 hm³ de agua bajo tierra y unos recursos del orden de 1500 hm³/año, de los que se aprovecha una porción muy pequeña, inferior al 10% (Loredo *et al.*, 2010). No estaría de más dedicar esfuerzos a definir mejor los sistemas hidrogeológicos de la región, actualizando la estimación de recursos y reservas, monitorizando manantiales, etc., ya que las cifras que se manejan corresponden a estudios realizados hace décadas (Plan de investigación de las aguas subterráneas; IGME, 1982). Una mejor caracterización cuantitativa y cualitativa sería deseable (redes de piezometría, control del volumen aportado por manantiales, calidad del agua subterránea y caudales extraídos por las captaciones), permitiendo que la información recogida fuese de libre acceso. Como bien dice el anterior autor, las ventajas de los acuíferos como «embalses subterráneos» respecto a los embalses convencionales de aguas superficiales son notorias: no es precisa la construcción de una obra de infraestructura costosa, tanto en términos económicos como ambientales, protección frente a evaporación y contaminación, posibilidad de regulación flexible, menores necesidades de tratamiento y de transporte, etc. No obstante, el coste del bombeo del agua subterránea hace que el aprovechamiento de la misma solamente se lleve a cabo cuando la disponibilidad de agua superficial no es suficiente para atender la demanda. Hasta el momento este ha sido el caso de Asturias: una abundante precipitación, con ríos caudalosos y una densidad de población baja hace que los embalses del Nalón y, en mucha menor medida, del Navia, logren cubrir gran parte de las necesidades (junto con agua de algunos manantiales, como se verá). Pero, si ponemos en contexto numérico los recursos de agua superficial y subterránea, observaremos que las diferencias entre las cifras son de uno o dos órdenes de magnitud. Por ejemplo, los embalses de Tanes y Rioseco en la cabecera del río Nalón, tienen una capacidad conjunta del orden de 40 hm³. Haciendo una sencilla cuenta, si se considera el espesor de caliza de la formación Barcaliente, en la escama de Rioseco, entre ambos embalses (en la que se encuentra excavada la sala de turbinas de la central de bombeo reversible), y tomando una porosidad media del 1%, el agua subterránea que este acuífero alberga sería en torno al doble de la cifra anterior. El total de capacidad de todos los embalses superficiales asturianos es del orden de los 500 hm³, mientras que el volumen de agua subterránea que se estima para la región es más de 12 veces superior. Es decir,

disponemos de mucha más agua subterránea que superficial.

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. En nuestra región existen abundantes recursos de aguas subterráneas, aproximadamente el 8% de los correspondientes a toda España (siendo el 2% en superficie). Aproximadamente los 2/3 orientales de Asturias están constituidos por rocas sedimentarias: el conjunto de rocas carbonatadas conocidas como calizas, también las dolomías, son el tipo de acuífero más frecuente en Asturias, como se detallará seguidamente. Algunas de ellas tienen buenas propiedades como almacenes de agua subterránea, que podrían, en caso de necesidad, aprovecharse.



Figura 2. A) Fuente en Rioseco de Sobrescobio, que drena la caliza de la Fm Barcaliente (abril de 2022). B) Fuente en las Hoces del río Aller, que drena la Fm Caliza de Peña Redonda (junio de 2022)

Haciendo una revisión histórica, destaca la figura de N. Llopis, que estudió las características hidrogeológicas de los alrededores de Oviedo (Llopis, 1957). En 1961, la Diputación provincial de Asturias encargó un estudio hidrogeológico de la zona central de la región al Instituto Federal para investigaciones del subsuelo de la República Federal Alemana, el cual destacó los acuíferos mesozoicos, a los que estimó un caudal medio aprovechable de 750 l/s (Hevia, 1973). Durante los años 70, ante el aumento de la demanda de agua como consecuencia de la industrialización, se planteó la necesidad de definir o cuantificar los recursos hídricos y realizar una planificación contando con los recursos superficiales y subterráneos. El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) realizó el Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (P.I.A.S., 1982), en el que se definieron en Asturias los siguientes cinco sistemas acuíferos: Unidad mesozoica Gijón-Villaviciosa, Unidad mesoterciaria Oviedo-Cangas de Onís, Caliza de Montaña cántabro-astur, Sedimentos calcáreos y dolomíticos precarboníferos y Franja móvil intermedia (un *sistema acuífero* es una unidad «práctica», desde el punto de vista de

investigación y explotación de agua subterránea, limitada espacialmente, que contiene uno o varios acuíferos independientes o interconectados hidráulicamente). En 1988 MOPU e IGME establecieron 369 unidades hidrogeológicas en la Península e Islas Baleares, de ellas 9 en el Principado de Asturias: Somiedo - Trubia - Pravia, Llantones, Pinzales - Noreña, Villaviciosa, Oviedo - Cangas de Onís, Llanes - Ribadesella, Región del Ponga, Peña Ubiña - Peña Rueda y Picos de Europa - Panes (una *unidad hidrogeológica* es una figura jurídica para facilitar la gestión administrativa de las aguas subterráneas y se define como uno o varios acuíferos agrupados a efectos de conseguir una racional y eficaz administración del agua). Finalmente, la Directiva Marco del Agua (2000) establece las denominadas *masas de agua subterránea*, definidas como: «un volumen de agua claramente diferenciado de aguas subterráneas en un acuífero o acuíferos». Según esta división, apoyada en las unidades tectonoestratigráficas, algunas masas de agua subterránea coinciden con los sistemas acuíferos definidos por el IGME, otras son resultado de la unión de varios y otras son de nueva definición. Así, se tienen, según el Plan Hidrológico vigente (2015-2021) de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico (DHC) Occidental, 12 masas de agua subterránea en el límite de Asturias: Eo-Navia-Narcea, Somiedo-Trubia-Pravia, Candás, Llantones-Pinzales-Noreña, Villaviciosa, Oviedo-Cangas de Onís, Llanes-Ribadesella, Santillana-San Vicente de la Barquera, Cuenca Carbonífera Asturiana, Región del Ponga, Picos de Europa-Panes y Peña Ubiña-Peña Rueda (CHC, 2015). Este Plan Hidrológico va a ser reemplazado por el nuevo 2022-2027 (en redacción) y en él se ha llevado a cabo una mejora en la caracterización de las masas de agua subterránea, modificándose el ajuste de los límites y la denominación de algunas de ellas, como es el caso del desdoblamiento de la primera de las anteriores en las masas: Eo-Cabecera del Navia y Navia-Narcea (CHC, 2021). En la siguiente figura se muestran las principales unidades hidrogeológicas de Asturias, así como las masas de agua subterránea definidas por el Plan Hidrológico pendiente de aprobación.

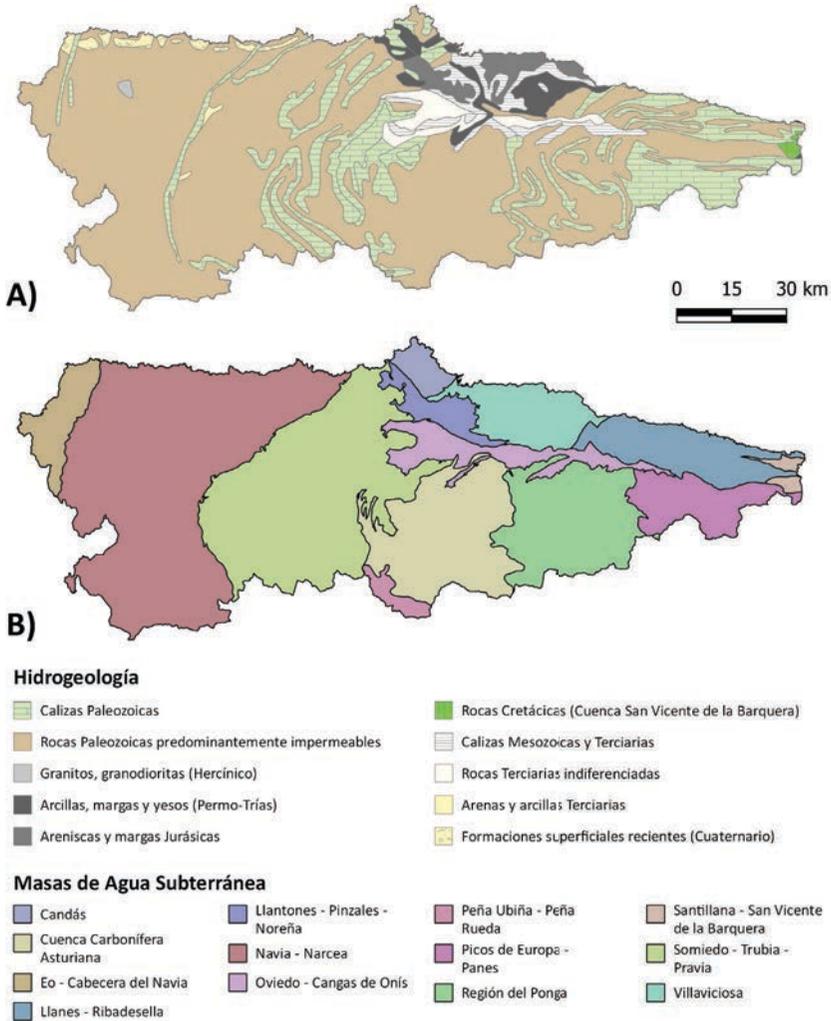


Figura 3. A) Principales unidades hidrogeológicas de Asturias (mod. IGME, 2022). B) Masas de agua subterránea de Asturias según la propuesta de Plan Hidrológico de la DHC Occidental (2022-2027) (CHC, 2021)

Así, en el ámbito territorial del Principado y en una primera aproximación, es posible distinguir dos regiones diferenciadas desde un punto de vista hidrogeológico. Por una parte, la región occidental, ocupada por un sustrato metasedimentario cambro-ordovícico de escasa permeabilidad (menos favorable) y explotado ocasionalmente mediante sondeos de pequeño diámetro que satisfacen demandas puntuales. Por otra parte, las zonas central y oriental de la región tienen un gran interés hidrogeológico ya que albergan acuíferos de importancia en los carbonatos del Devónico y Carbonífero y en los conjuntos arenosos meso-terciarios. En los almacenes naturales de la parte oriental se dispone de grandes recursos y en la parte central, de grandes reservas de agua donde, además, se localiza la mayor demanda (Loredo *et al.*, 2010). De hecho, el Plan Director de abastecimiento de agua del Principado (2020-2030) propone utilizar el agua subterránea para el abastecimiento de los concejos montañosos del oriente de Asturias (LNE, 2022a).

Si nos situamos en el Cabo Peñas, punto más septentrional de nuestra región, y vamos describiendo una línea arqueada hacia el sur, pasando por Salas, atravesando el río Narcea a la altura de la cuna del General Riego (Tuña) y continuando hasta las brañas occidentales del término municipal de Somiedo, habremos trazado, de forma aproximada, el límite a partir de cual podemos hablar de sistemas acuíferos propiamente dichos. Entre el límite anteriormente definido y la terminación oriental de la cordillera del Aramo existen importantes acuíferos constituidos por rocas carbonatadas, siendo los más importantes los de la mitad superior de la Era Paleozoica (Formaciones Moniello, Caliza de Candás, Barcaliente y Valdeteja). Algunos ejemplos bien conocidos son las calizas de los núcleos de los sinclinales de Somiedo o del Naranco, o la propia *sierra del Aramo que, a través de la captación de los manantiales de Llamo y Code (Riosa), Cortes y Lindes (Quirós) y algunos otros de menor caudal, alimenta a la ciudad de Oviedo, a través del denominado canal del Aramo (de unos 70 km), cuyo exceso de agua es almacenada en el embalse de los Alfalorios, de 9,4 hm³ de capacidad*. Se puede mencionar a ese respecto, el antiguo *Acueducto de los Pilares de Oviedo*, del s. XVI (Figura 4A), que tardó 30 años en construirse para llevar agua al centro de Oviedo. El trazado de la traída, que captaba el agua de los manantiales del Monte Naranco (Ules, Boo y Fitoria) era de unos 8 km en total y el acueducto originalmente tenía 390 metros de largo y 10 de alto (actualmente solo se conservan 5 arcos). Estuvo activo hasta principios del s. XX, cuando fue sustituido por un sistema de depósitos de agua diseñado por el ingeniero asturiano P. Pérez de la Sala.

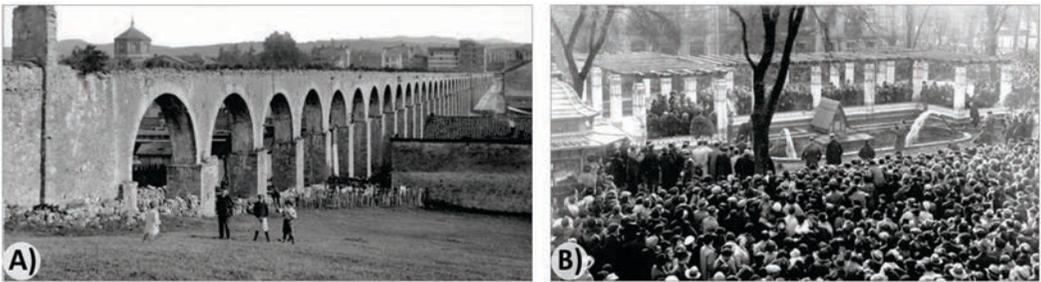


Figura 4. A) Antiguo acueducto de Los Pilares, que transportaba agua procedente de los manantiales del Monte Naranco al centro de Oviedo (El Comercio, 2015); B) Acto solemne de la llegada de las aguas del manantial del Perancho al estanque de Los Campinos (Gijón) en 1930 (LNE, 2012)

Continuando el periplo en sentido Oeste-Este, el conjunto de materiales anteriores se superpone por medio de una gran falla inversa a las rocas que ocupan la parte central y meridional de la región, sector conocido, por su destacada importancia minera, como «Cuenca Carbonífera Central». Aunque por razones algo diferentes a las citadas en el caso del tercio occidental de la región, tampoco existen en esta zona acuíferos de gran entidad, salvando la excepción de lo que ocurre en su límite oriental, situado en las estribaciones del cordal de Peñamayor, donde aflora el manantial de Perancho (Nava), que se utiliza para el abastecimiento de Gijón (Figura 4B). En todo caso, y como se verá en detalle en la segunda mitad de esta lección, los más de dos siglos de laboreo minero han generado en esta cuenca embalses subterráneos que ofrecen posibilidades de aprovechamiento de enorme interés.

A la altura de Rioseco de Sobrescobio abandonamos la cuenca carbonífera central para adentrarnos en las montañosas tierras de Campo de Caso. La región del Ponga nos recibe con dos embalses superficiales, que son los de Rioseco y Tanes, de donde procede la mayor parte del suministro de la región asturiana. El lector interesado podrá hacerse una idea de la extensa red de abastecimiento necesaria para hacer llegar el agua desde este

punto hasta toda la parte central del Principado, llegando en la actualidad hasta Soto del Barco. Este largo viaje invita a una reflexión pausada la próxima vez que, al abrir el grifo, el agua fluya en nuestra casa con la normalidad con la que siempre hemos aceptado este gesto. Si recorremos la AS-117 hasta el puerto de Tarna, en sentido inverso al flujo de las aguas del Nalón, no seremos ajenos al contraste paisajístico que producen las elevadas cumbres calizas del Parque Natural de Redes en comparación con las modestas cotas que alcanzan las divisorias de la cuenca carbonífera central. Estas calizas, también carboníferas en edad (formaciones Barcaliente y Escalada) –pero más antiguas que las capas de carbón que han quedado atrás– dotan a la región del Ponga de importantes recursos. *Buena prueba de ello son los caudalosos manantiales que, como la fuente de «La Fontona», en el desfiladero de Los Arrudos (Caso), brotan en el contacto entre las calizas carboníferas y otros niveles más impermeables y constituyen, a través de casi 60 km de canalizaciones, buena parte del suministro a Gijón.*

En el extremo oriental del Principado, tenemos la lejana unidad de Picos de Europa. Hidrogeológicamente, esta región es un gigantesco embalse de agua subterránea natural. Tanto en la unidad de Somiedo-La Sobía-Aramo como en la región del Ponga, los conjuntos calizos que arman los principales acuíferos están formados por dos unidades litoestratigráficas que se disponen seguidas, y que se conocen como formaciones Barcaliente (inferior) y Valdeteja (superior). Su espesor más frecuente es de varios cientos de metros, situándose el mínimo en torno a 200 m. Pero en Picos de Europa se conjugan dos factores que multiplican la capacidad de almacenamiento: por una parte, la existencia de un tercer nivel de calizas, más joven, a techo de la formación Valdeteja, que se conoce como «formación Picos de Europa» y con la que el espesor acumulado de calizas sobrepasa ampliamente los 1000 m, llegando localmente a 1500. Por otra parte, la tectónica juega un papel muy importante en la disposición geométrica espacial de estos materiales, haciendo que se superpongan entre sí repetidas veces e incrementando dicha potencia. Así, la elevada precipitación debida a su altitud media se combina con una aceptable permeabilidad de estos materiales, proporcionándoles una alta recarga. De este modo, las buenas características como acuíferos de las tres unidades calcáreas logran una conjunción armónica que se traduce en unos recursos de más de 500 hm³/año (700 hm³ de reservas) en una superficie geográfica bastante limitada.

Según se puede apreciar en la Figura 3A, restan por comentar dos grandes sistemas acuíferos, que se corresponden con las rocas más jóvenes: el más septentrional, que se extiende desde el este del Cabo Torres en Gijón hasta Caravia y se cierra al sur entre Villabona y Torazo, y cuyo principal nivel acuífero son las calizas y dolomías del Jurásico Inferior que se conocen como «formación Gijón» por reconocerse bien en las inmediaciones de la ciudad más poblada de nuestra región. Estas calizas liásicas *se aprovechan mediante pozos de bombeo ya instalados por la Empresa Municipal de Aguas de Gijón (EMA) en la zona de Cabueñes y mediante la captación del manantial de Llantonos.* Esta formación pertenece al gran embalse subterráneo constituido por la unidad hidrogeológica «Gijón-Villaviciosa», que cuenta con unas reservas de 800 hm³ y unos recursos de 58 hm³/año (IGME, 1990) e incluye, además de la formación Gijón, unos niveles conglomeráticos permotriásicos con bastante agua. A este respecto, el ingeniero de minas T. Hevia indica que a principios del s. XX los pozos en la zona de La Camocha (Caldones) eran muy prometedores (caudal de hasta 60 l/s). La S. A. Felgueroso ofreció este recurso al Ayuntamiento de Gijón, pero su explotación no se llevó a cabo quizá por la dureza de sus aguas o porque ya estaba en servicio la captación de los Arrudos. Caudal similar se alcanzó en el sondeo de Peón, en las afueras de Gijón, que captaba también dicho nivel permotriásico (Hevia, 1973).

Por último, restaría indicar las principales características de la depresión central asturiana, también conocida con las denominaciones de «surco prelitoral» o, simplemente,

«Cuenca Cretácica y Terciaria». Se trata de una franja de dirección E-W que se dispone entre Oviedo y Cangas de Onís y que tiene una geometría de sinclinal («U») muy laxo. Entre Oviedo e Infiesto este conjunto es muy potente y dada su elevada porosidad eficaz, almacena gran cantidad de agua, aunque la que se renueva anualmente, lejos de ser modesta, no es especialmente importante (3300 hm³ de reservas, 100 hm³/año de recursos). Cabe hacer notar que en este sistema el protagonismo es también de las rocas detríticas, que también constituyen importantes almacenes de agua subterránea.

En nuestra región tenemos el enorme privilegio de poder abastecernos mayoritariamente de agua superficial: pero este privilegio no es compartido con las regiones situadas al sur de la cordillera cantábrica. Donde hay mucha demanda y los ríos son pocos caudalosos, la supervivencia de los ecosistemas y el bienestar humano dependen de los acuíferos y de otros dos factores: los sondeos (de manera informal, pozos) y las bombas. Como se acaba de describir, la mayor parte de los recursos utilizados en Asturias proceden de sistemas hidrogeológicos cuyos almacenes son las calizas que tradicionalmente han sido un elemento fundamental en la satisfacción de la demanda de los núcleos urbanos. Incluso en la actualidad, después de la entrada en funcionamiento del Consorcio de Aguas de Asturias (CADASA), constituyen más del 50% de los aportes a Oviedo y Gijón. Por su singular importancia, cabe hacer mención expresa a los acuíferos constituidos por calizas carboníferas, que han proporcionado hasta los años 80 el abastecimiento a Gijón, Oviedo, Llanera, Langreo, Laviana, Aller y Mieres, con un agua de excelente calidad, prácticamente sin necesidad de tratamiento. Avilés, tercera ciudad en importancia de la región, se abastece principalmente de agua superficial a través del Canal del Narcea desde la toma situada en Quinzanas.

En su interesante trabajo de 1973, T. Hevia realizó unas previsiones de demanda de agua en nuestra región para 2025, sobre la base de una población estimada de casi 1.200.000 habitantes, de unos 200 hm³/año. Naturalmente, el contexto industrial de aquel momento invitaba a ser más optimista que el escenario actual en cuanto a previsiones futuras. Si bien no se equivocó demasiado en la población (la actual es inferior a la prevista, pero muy próxima a un millón de personas en este momento, y probablemente similar para 2025), sí lo hizo en cuanto a la demanda que, reuniendo datos de diversas fuentes (INE, 2020; LNE, 2022b) se sitúa en unos 76 hm³/año. De estos, 16,8 corresponden a la gran industria (algo menos que la ciudad de Gijón, principal consumidor, que con algo más de 270.000 habitantes consumió 19,2 hm³ en 2021). El Dr. Hevia seguramente esperaba una industrialización mayor y/o más duradera, y no tuvo en cuenta la implementación de los sistemas de ahorro y otras mejoras en la gestión, además de la concienciación social en cuanto a lo limitado del recurso.

En cuanto a su calidad, el estado de las aguas subterráneas en Asturias es también poco conocido. Por norma general se puede esperar que este sea bueno, ya que no se ve afectado por fuentes de contaminación difusa como la agricultura intensiva, si bien puede verse comprometida por fuentes puntuales. A este respecto, la Confederación Hidrográfica del Cantábrico establece que *«actualmente, todas las masas de agua subterránea de la DHC Occidental están en buen estado, si bien el conocimiento de las mismas es inferior al necesario, y es preciso acometer la definición de valores umbral para nitratos y fosfatos en las masas de agua subterráneas, de acuerdo lo establecido en el RD 1075/2015»* (CHC, 2021).

2.6. Aguas minerales y termales

La composición química de las aguas subterráneas se origina como resultado de un proceso complejo de interacciones; al infiltrarse, las aguas procedentes de las preci-

pitaciones pueden incorporar gases de la zona no saturada del suelo y fases disueltas presentes en la zona saturada. El equilibrio químico-físico de estas aguas depende de la temperatura y la presión del sistema y cualquier cambio en esas condiciones produce una variación en su composición química, dando lugar a la disolución de minerales o a la precipitación de estos. Una parte de las aguas subterráneas, las denominadas «aguas minerales», presentan unas características físico-químicas diferenciadas del resto, por su grado de mineralización y/o temperatura. Aunque no existe una definición exacta y globalmente aceptada, una característica general que las diferencia de la mayoría de las demás aguas subterráneas es su elevado tiempo de residencia en el acuífero (oscila entre décadas y miles de años), responsable de la fuerte mineralización que con frecuencia presentan. Son aguas de circulación profunda y, en consecuencia, aunque no necesariamente, con gran tiempo de residencia en el acuífero. Durante esta larga permanencia han estado sometidas a procesos físicos y químicos de interacción con la roca, intercambiado materia con el medio sólido, o incorporando restos de otras aguas. En relación a las aguas subterráneas comunes, de más rápida renovación y mucho más abundantes a profundidad somera, las aguas minerales son más salinas, con contenidos elevados de determinadas especies químicas, y presentan relaciones iónicas que difieren de los valores más frecuentes.

La industria del agua mineral nació en Europa entre los siglos XVIII y XIX gracias al éxito del sector termal y la reputación terapéutica del agua. Las aguas minerales comenzaron a envasarse y venderse en farmacias a principios del siglo XX bajo el nombre de «minero-medicinales» debido a la popularidad de los balnearios y el deseo de sus huéspedes de seguir disfrutando de estos beneficios en su hogar. Después de la Segunda Guerra Mundial, comenzó a venderse en supermercados, restaurantes o cafeterías, para luego pasar al sector industrial y convertirse en un producto de uso común, ya que se venden más de 30.000 millones de litros anuales, que se asocia a un estilo de vida saludable y como alternativa de los refrescos. Este sector se centra en Europa, pero cada vez más en América y Asia (La Región, 2017).

A diferencia de otras aguas subterráneas, las aguas minerales mantienen prácticamente constante su temperatura, caudal, microflora y composición química. Las normas establecen que deben poseer más de un gramo de elementos disueltos por litro de agua o bien componentes especiales por cantidad superior a determinadas proporciones; también se establecen restricciones con relación a temperatura y no deben poseer gérmenes patógenos. El *agua mineral natural* se diferencia del agua potable, caracterizándose por su contenido mineral y sus proporciones relativas, así como la presencia de elementos traza («oligoelementos») o de otros constituyentes útiles para el metabolismo humano. Se obtiene directamente de manantiales o de pozos perforados en acuíferos y se capta en condiciones que garantizan su pureza microbiológica original (la normativa que regula el proceso de elaboración de aguas de bebida envasada solo permite dos modificaciones en el agua mineral natural, para mejorar su calidad sin variar sensiblemente la composición inicial: eliminar compuestos naturales inestables como hierro y azufre para evitar color, olor o sabor no deseables y modificar su contenido en gas carbónico, para conseguir «aguas con gas»). Cuando un agua mineral, por su composición y características propias, puede ser utilizada con fines terapéuticos, dadas sus propiedades curativas demostradas o efectos beneficiosos para la salud humana (función diurética, antiinflamatoria, antirreumática, etc.), que se conservan aun siendo envasada, se denomina *agua mineral medicinal* (IGME, 2000).

La Ley 22/1973 de Minas (modificada por el RD 2857/1978) distingue en su Sección B entre *aguas termales* (aquellas cuya temperatura de surgencia sea superior en 4º C a la media anual del lugar donde alumbren) y *minerales*. Dentro de estas últimas, diferencia las *aguas minero-medicinales* (las alumbradas natural o artificialmente que por sus ca-

racterísticas y cualidades sean declaradas de utilidad pública) y las *aguas minero-industriales* (las que permitan el aprovechamiento racional de las sustancias que contengan, como una salmuera, por ejemplo).

La evolución química del agua subterránea depende de los minerales con los que entre en contacto, de las condiciones de pH y potencial redox del medio y del tiempo de tránsito. Lógicamente, si el agua atraviesa yeso (sulfato cálcico hidratado) se enriquecerá en ion sulfato (SO_4^{2-}) y en ion calcio (Ca^{2+}); si atraviesa rocas carbonatadas como calizas o dolomías se incrementará su contenido en ion bicarbonato (HCO_3^-), etc. Los procesos químicos que puede experimentar un agua subterránea son muy variados, pero en general se observa la secuencia de Chebotarev, según la cual las aguas con menor tiempo de residencia son (generalmente) bicarbonatadas y a medida que aumenta su edad van siendo más sulfatadas y las más antiguas, de mayor tiempo de permanencia son más cloruradas (mayor contenido en Cl^-). En lo que se refiere a los cationes, la secuencia análoga sería facies cálcica (Ca^{2+}) - magnésica (Mg^{2+}) - sódica (Na^+). Así, podría decirse, aunque no se puede generalizar y depende de cada acuífero en particular, que un agua joven es más fácil que tenga una facies bicarbonatada cálcica y un agua vieja (que se infiltró hace mucho tiempo) cuenta con una mayor probabilidad de presentar una signatura clorurada sódica. Es común que el potencial redox sea reductor en muchas aguas termales y minerales. El pH puede presentarse en un amplio rango y la conductividad eléctrica puede ser elevada. Otro parámetro físico-químico que las caracteriza es la radiactividad, consecuencia de la presencia de isótopos inestables, ya que las aguas subterráneas, al travesar ciertas rocas, van disolviendo U, Ra, etc., por lo que es normal que las aguas termales contengan niveles de radionucleidos naturales varios órdenes de magnitud superiores a los de las aguas superficiales.

En cuanto a la repercusión económica de las aguas minerales, la industria española de aguas envasadas incluye un centenar de empresas distribuidas por todo el territorio nacional, que dan empleo directo a casi 4000 personas e indirecto a decenas de miles. Se trata de un sector dinámico con una facturación anual superior a los 1000 millones de euros, al embotellarse en torno a 7000 millones de litros/año. Además, esta industria se instala en los lugares de captación del acuífero, que suelen coincidir con zonas rurales sin tejido industrial, por lo que crea riqueza en zonas económicamente deprimidas (IGME, 2000; Martínez-Santos, 2018). Según la Federación Europea de Aguas Envasadas (EFBW), España se sitúa como 4º país de la UE en producción de agua mineral, por detrás de Alemania, Italia y Francia, y 3º en consumo, tras Italia y Alemania (García-Marín *et al.*, 2020). Más del 96% de la producción corresponde a las aguas minerales naturales sin gas. La gran diversidad geológica en España se traduce en una alta variedad de aguas minerales, que en función de sus propiedades son destinadas a distintos fines: aguas minerales de bebida envasada, aguas minerales de uso tónico que se emplean en balnearios con fines medicinales y ciertas aguas minerales con concentraciones elevadas de sustancias químicas que tienen un uso industrial.

El coste del agua del grifo que se consume en una casa en un día es similar al de un litro de agua embotellada. La calidad del agua de grifo en España ocupa los primeros lugares del ranking europeo en calidad, precio, regularidad de suministro, pero nuestro país es uno de los principales consumidores mundiales de agua embotellada. La población española gasta más de 1000 millones de euros/año en agua embotellada, con un consumo per cápita de más de 100 l/año.

En Asturias se han inventariado más de 50 manantiales de aguas minerales, algunos conocidos desde tiempos inmemoriales, pero a los que en su mayor parte no se presta la debida atención (muchos presentan contaminación química y/o bacteriológica). Se distribuyen por toda la región, pero con menor abundancia en la parte occidental, por

su menor potencial hidrogeológico, como ya se ha indicado en el apartado anterior. Las denominaciones de estas fuentes hacen a veces referencia a sus características (por ejemplo «Poza Salau» o «El Salmorial» por su alta salinidad o «Fuente de los Huevos Podres» por su olor a ácido sulfhídrico), aunque a veces pueden resultar engañosas (Gutiérrez-Claverol y Luque, 1994). A algunas de estas aguas se les atribuyen desde antiguo efectos terapéuticos y algunas han sido destinadas a instalaciones balnearias o explotadas para su envasado industrial. En general, sus caudales suelen ser bajos, normalmente inferiores a 0,1 l/s y en cuanto a sus características químicas, predominan las aguas bicarbonatadas, aunque también existen otros tipos. Como aguas minerales comercializadas en Asturias, se pueden citar: «Fuensanta» (Nava), «Galea» (Siero), «Agua de Cuevas» (Felechosa), «Agua de Somiedo» (Somiedo), «Agua de Borines» (Piloña) y «Agua de Ques» (Piloña), aunque las dos últimas han cesado su actividad.

En cuanto a las aguas termales, se pueden clasificar en función de su temperatura en: frías (<20 °C), hipotermas (20-35 °C), mesotermas (35-45 °C) e hipertermas (>45 °C). Se denomina *gradiente geotérmico* al incremento de la temperatura con la profundidad en el subsuelo. Desde el punto de vista geotérmico, existen dos tipos de regiones: las que pueden denominarse «normales» (que cubren más del 90% de la corteza terrestre, con un flujo medio de calor y un aumento de la temperatura de 3° C por cada 100 m de profundidad) y aquellas anormalmente calientes donde el flujo es superior al normal, con gradientes geotérmicos de hasta 50 °C/100 m. Estas áreas con gradientes geotérmicos anómalos suelen presentar en superficie aguas minerales con cierto grado de termalismo, que puede estar relacionado con actividad ígnea reciente, volcánica o plutónica y actividad sísmica o de tectónica activa. No es el caso de Asturias. No obstante, algunas circunstancias locales, como la circulación profunda del agua subterránea (de forma que adquiera una mayor temperatura), seguida de un rápido ascenso a través de fracturas, pueden explicar la presencia en superficie de manantiales termales en regiones de gradiente geotérmico normal. Es el caso de las aguas termales de Asturias, que presentan relación directa con grandes zonas de fracturación que alcanzan profundidades significativas, lo que permite la circulación ascendente del agua calentada por efectos geotérmicos (el 21% de las aguas minerales constatadas en Asturias son termales, superando muy raramente los 40° C).

Alguno de estos manantiales ha tenido un uso balneoterápico. Ejemplo emblemático es el Balneario de Las Caldas (de Priorio) en Oviedo, utilizado desde el s. XVII y recientemente rehabilitado, donde las gentes acudían buscando todo tratamientos reumáticos y respiratorios, y que presenta la mayor temperatura de las fuentes termales de Asturias (37-43°C; considerando el gradiente geotérmico y el enfriamiento gradual durante su ascenso, se estima que esta agua fluye a una profundidad de 1,3 - 1,8 km antes de surgir en superficie). Esta agua fue estudiada por el Dr. Casal, médico de Oviedo en el s. XVIII, quien la recomendaba a sus pacientes, ya que consideraba que los baños eran de gran utilidad en procesos reumáticos o distonías, ciertos humores viscosos e infertilidad femenina. Posteriormente también fue aplicada para tratamiento de alteraciones cutáneas (existía un baño general para sarnosos) e incluso para algunas patologías digestivas y cardíacas (Pérez-Bustamante, 2015).

Otros ejemplos en esta región son el antiguo balneario de Andinas (Ribadedeva; 31,4°C), la fuente de Puentellés (Peñamellera Baja; 30°C), el balneario de Mestas de Ponga (29-30°C), las aguas de Fuensanta de Buyerés (Nava; 21-28°C), la fuente de Caldas de Cares (Cabres; 22°C), etc. (IGME, 2002; Luque y Gutiérrez-Claverol, 2010). Cabe realizar en este punto una destacada mención al aprovechamiento energético que se puede hacer de las aguas de baja entalpía, como ciertas aguas termales y las aguas de mina, pero eso se tratará más adelante.

Son muchas las actividades antrópicas que pueden degradar la calidad del agua subterránea, ya sean puntuales o difusas. Si bien es verdad que las aguas subterráneas están menos expuestas a la contaminación que las superficiales, también es cierto que una vez que se produce la contaminación de un acuífero, es complicado técnica y económicamente revertir dichos efectos, de ahí que sea fundamental poner en marcha métodos preventivos. El agua mineral no es solo un bien escaso sino muy vulnerable, porque normalmente corresponde a sistemas de circulación de agua subterránea cuyo equilibrio hidrodinámico e hidroquímico es frágil y, por tanto, muy sensible a acciones exteriores. Por ello es sustancial la caracterización de las aguas minerales, que se han de mantener separadas de otras aguas y protegidas de toda acción antrópica potencialmente contaminante, estableciendo áreas de restricciones dentro de una zona denominada *perímetro de protección*.



El agua y la mina

El agua en la mina está siempre presente y resulta necesaria para muchas de las actividades que en ella se desempeñan (refrigeración, operaciones mineralúrgicas y metalúrgicas para el tratamiento del mineral, etc.), y en ese caso su calidad debe ser controlada. La actividad minera interfiere con el agua superficial y particularmente con la subterránea, ya que cuando las labores descienden por debajo del nivel piezométrico, el agua ha de ser bombeada para poder trabajar en seco. Esto puede suponer un desafío técnico y económico, dependiendo del agua que se infiltre a los huecos mineros, lo que a su vez depende del tipo de explotación, el clima y la hidrogeología local. El agua en la mina puede suponer inconvenientes, como dificultades de trabajo para mineros y equipos (maquinaria y explosivos) por trabajar «en húmedo» (en las labores de interior en que el personal haya de realizar el trabajo mojado, se reduce el número de horas de la jornada y este se incentiva), coste e inconveniencia del desagüe (por ejemplo, en la mina de zinc-plomo de Reocín (Cantabria), cerrada en 2003, se bombeaba un caudal medio de 1200 l/s con un coste entonces de 3 millones de euros al año), coste extra por transportar material húmedo, riesgo para los trabajadores por la dificultad de evacuación en caso de avenidas, desestabilización de frentes de excavación, etc. En 1902, al perforar un pozo minero en lo que sería la futura mina de La Camocha, apareció tanto caudal de agua (más de 55 l/s) a partir de los 45 m de profundidad, que imposibilitó su desagüe y se tuvo que abandonar (Adaro, 1967). *En la mina, el agua es amiga y enemiga a la vez.*



Figura 5. A) Drenaje de agua al interior de la mina subterránea de Reocín (cortesía de AZSA); B) Galería del pozo Barredo inundada (cortesía de HUNOSA)

3.1. Efectos hidrogeológicos de la actividad minera. Paradigma de la minería de carbón en Asturias

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). 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. 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. 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 exigente legislación vigente, así como un mayor compromiso y concienciación ambiental hacen que las actuales actuaciones vayan orientadas a analizar, identificar y eliminar los posibles efectos negativos e incluso obtener balances positivos, como se comentará más adelante.

La Cuenca Carbonífera Central Asturiana (en adelante, CCC), se ubica en la zona centro-meridional del Principado de Asturias, abarcando una extensión de aproximadamente 1400 km². Con explotaciones mineras desde hace más de 200 años, es una de las zonas mineras más importantes de España (el mayor afloramiento carbonífero de la península), habiendo llegado, en los años 90 del pasado siglo, a contribuir con el 70% del total de la producción de carbón del país. Desde el punto de vista hidrogeológico, la CCC está constituida por materiales con una permeabilidad primaria intrínseca muy modesta que, aunque pueden dar lugar a pequeños acuíferos, no constituyen sistemas acuíferos de importancia. Se enmarca dentro de la denominada «Unidad Paleozoica» (IGME, 1984) y se encuentra incluida en la que actualmente se denomina Masa de Agua 012.012:

Cuenca Carbonífera asturiana. Los materiales de la CCC (lutitas, limolitas, areniscas, microconglomerados, conglomerados, calizas, capas de carbón y depósitos cuaternarios) se comportan hidrogeológicamente como un acuífero multicapa de muy baja porosidad y permeabilidad, donde las areniscas actúan como limitados almacenes y las lutitas y las capas de carbón como confinantes de muy baja permeabilidad. Las únicas vías de circulación de agua dignas de consideración son las fracturas abiertas y las zonas de descompresión asociadas a ellas, lo que significa que el comportamiento hidráulico está más ligado al estado de fisuración o alteración de las rocas que a la litología. 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 «pseudokárstico» artificial en un macizo en el que inicialmente podrían únicamente existir niveles de baja transmisividad (Pendás y Loredó, 2006).

La minería de la CCC comenzó con la *minería de montaña*, mediante galerías en capa, de forma que el arranque de carbón se producía en talleres entre dos galerías a diferente cota, normalmente 50 m. Esta fase de minería de montaña produjo un deshulle de los paquetes productivos desde el nivel del valle hasta el afloramiento de las capas en superficie. Una vez agotado el yacimiento explotable de esta forma, se continuó su explotación mediante pozos, verticales o inclinados (*minería de pozo o subterránea*), que facilitaban el acceso a cotas inferiores y donde se reproducía el esquema de la minería de montaña, con la variación obligada por la mecanización del transporte y las necesidades de garantizar una correcta ventilación (Figura 7). Ello propició la apertura de galerías principales en roca («estéril»), de mayor sección, desde las que se accedía a las capas con transversales cada cierta distancia, abandonando las galerías en capa según se iba llegando a un nuevo transversal. Dado que la minería de montaña había dejado un *macizo muy «tronado»*, en el argot minero, que facilitaba la infiltración de agua, tanto a través del macizo rocoso como de las capas de carbón, se intentó en la fase de pozos, a partir de los años 40, dejar macizos de protección sin explotar de hasta 50 m desde la superficie. Sin embargo, estos macizos no se han respetado debidamente y los hundimientos creados por los huecos explotados han generado fisuración, lo que facilita la infiltración de agua, 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 llegando a alcanzar profundidades de hasta casi 1000 m (en el pozo Carrio) lo que en algunas zonas significó llegar por debajo de la cota -600 m.s.n.m., dando así una idea del espesor del macizo afectado (Jardón, 2010).

Las explotaciones mineras de carbón en Asturias han distorsionado el flujo natural del agua subterránea, haciendo casi desaparecer las fuentes que existían por encima del nivel de los valles afectados y dando lugar a un nuevo acuífero (el *embalse minero*) similar a los kársticos, de triple porosidad, debida a la porosidad primaria (baja), las fracturas del macizo rocoso como consecuencia de las labores de extracción y la red de huecos de labores mineras, a su vez comunicados entre sí (Pendás *et al.*, 2002). Este tipo de acuíferos se caracterizan por su complejidad e impredecibilidad (Loredó *et al.*, 2000). Las labores mineras, pozos y galerías, en conjunto, constituyen unas captaciones que drenan el macizo rocoso profundo, en el cual, dada su baja permeabilidad, el agua circula por conductos preferenciales de escasa o nula capacidad de almacenamiento, como ponen de manifiesto los pequeños caudales de las filtraciones a las labores, que en la mayoría de los casos no pasan de ser goteos (Jardón, 2010).

La actividad minera ha modificado los parámetros hidrogeológicos de los materiales de la CCC implicados, incrementándolos notablemente (sobre 2 órdenes de magnitud) respecto a sus valores iniciales, ya que a su porosidad intergranular o primaria, se añade una secundaria fundamentalmente debida a grietas, fisuras y huecos de tipo mecánico

inducidos por la actividad minera (fundamentalmente en rocas competentes como pizarras arenosas y areniscas). Por ejemplo, por la acción de la explotación minera en la zona del Aller, la porosidad de un acuífero estudiado por García-Fuente en 1996 pasa de un 1% a superar el 10%, su permeabilidad de 10^{-1} a 100 m/día y su transmisividad de 10 a 1000 m²/día.

*Las explotaciones mineras subterráneas también pueden afectar a las aguas superficiales a raíz de fenómenos de fracturación y subsidencia. Las fracturas inducidas por las labores se transmiten hacia la superficie afectando a los cauces de los ríos, que se convierten en perdedores y permiten que parte de su caudal se «cuele» en los huecos mineros. Esto se pudo constatar en el río Turón, al establecer dos puntos de aforo (medida del caudal) aguas arriba y aguas abajo de la cuenca de afección del embalse minero constituido por las labores mineras de los pozos Barredo y Figaredo, conectados entre sí. Obtenidos los hidrogramas (gráficas que representan caudal frente a tiempo), a partir de datos diarios de caudal recogidos durante dos años tras una intensa campaña de campo, resulta llamativo que el caudal medio en la sección de aforo aguas abajo de la zona minada por el pozo Figaredo es menor que el de la sección situada aguas arriba. Esta diferencia es de unos 61 l/s, los cuales son infiltrados a los huecos mineros del sistema Barredo-Figaredo. Ello encaja con el hecho de que durante la vida activa de la mina se mantenía un cierto bombeo en los periodos secos, indicando que existe un aporte «constante» de infiltración, además del procedente de las precipitaciones, y que corresponde a la infiltración diaria de agua del río Turón, en la zona más fracturada a su paso por las labores de Figaredo (Ordóñez *et al.*, 2012). Esto se ha observado también en estudios realizados en otras zonas con minería de fluorita (Asturias) y de carbón (Área Candín-Fondón en Asturias y El Bierzo en León) (Álvarez *et al.*, 2016 y 2018). Al tratarse de ríos que fluyen todo el año, el volumen de infiltración hacia las labores no depende del caudal de los mismos, sino que se trata de un aporte casi constante, a través de las fracturas que las conectan con el río. Esta infiltración depende de la profundidad de las labores y de la permeabilidad y afectación del terreno suprayacente.*

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 periodo 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). *El profesor Paul Younger (1962-2018), hidrogeólogo británico y experto de talla internacional en agua de mina, fue investido Doctor honoris causa por la Universidad de Oviedo en 2010.*

3.2. Desagüe de las explotaciones activas

La escorrentía subterránea ha sido, desde siempre, un impedimento para el trabajo en las minas, dada la necesidad de evacuar el agua para poder trabajar en seco. Algunos de los métodos clásicos más utilizados para este fin han sido las galerías de drenaje, la bomba de pistón, el tornillo de Arquímedes o las ruedas elevadoras (Weisgerber, 1979). En relación al desagüe de minas, Posidonio, en el s. I a. C., dice que «*los turdetanos (pueblo prerromano que habitaba la actual Andalucía occidental y parte de Portugal) abren sinuosas y profundas galerías, reduciendo a menudo las corrientes que en ellas se encuentran por medio de tornillos egipcios*». Además de en otros lugares, en el denominado «Filón Norte» de Minas de Tharsis, en el distrito minero de Riotinto (Huelva), se descubrió una instalación formada por cinco pares de ruedas de 4,5 m de diámetro, dispuestas escalo-

nadamente, pudiendo apreciarse cómo las ruedas del nivel superior vertían el agua a una galería de desagüe (Delgado y Regalado, 2012). Estas norias, datadas como romanas, se conocían como «*rota aquaria*» o «norias de sangre», dado que su tracción era posiblemente humana (Figura 6A) o, en todo caso, animal.

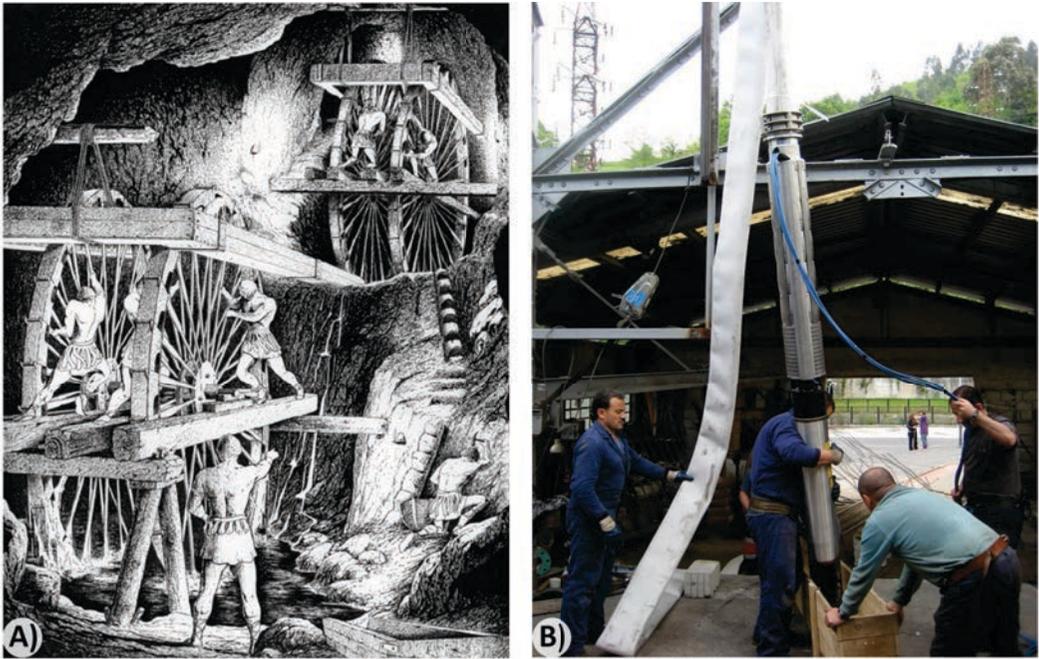


Figura 6. A) Esquema de las «norias de sangre» en Riotinto (Delgado y Regalado, 2012). B) Bomba sumergible GRUNDFOS de caudal nominal 215 m³/h y altura nominal 60 m (cortesía de HUNOSA)

Ya en épocas recientes, una revolución en el sistema de extracción de agua tuvo lugar a principios del s. XX con el empleo de bombas centrífugas y su accionamiento con motores de combustión interna y eléctricos. Desde mediados del s. XX se generalizó el uso de electrobombas sumergibles que, con poco diámetro, permiten conseguir gran altura de elevación (bomba y motor forman un único cuerpo y el motor es refrigerado por el agua del sondeo; Figura 6B).

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 y normalmente mediante bombas, aunque la opción del desagüe por gravedad será siempre preferida, si resulta técnicamente viable, por el ahorro económico que entraña. Como ejemplo, se puede citar la explotación de El Valle-Boinás (Asturias), ubicada dentro del cinturón del río Narcea, uno de los más importantes distritos auríferos del NO de la Península Ibérica, que ha sido explotado de forma intermitente desde 1997 hasta la actualidad. El yacimiento está asociado a un stock de rocas graníticas, que encaja en los materiales carbonatados de la formación Láncara, de la que procede el mayor aporte de agua subterránea a la mina, pese a su baja permeabilidad (10⁻⁵ m/s). En una primera fase, y gracias al asesoramiento del *ingeniero de minas y catedrático de Hidrogeología en la Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo, Fernando Pendás (1937-2019)*, se abrió como sistema de drenaje una galería subhorizontal ligeramente descendente para permitir el desagüe por gravedad, con sondeos de drenaje, de forma que el

nivel piezométrico descendió posibilitando la explotación a cielo abierto. A medida que se fueron descubriendo y explotando zonas a mayor profundidad, el sistema de drenaje se fue adaptando hasta el actual bombeo continuo dentro de las labores de interior.

El drenaje es necesario en todas las explotaciones mineras que profundizan por debajo del nivel piezométrico, ya sean estas a cielo abierto o minas subterráneas como las de carbón de la CCC en Asturias. Cuando las formaciones geológicas atravesadas por las labores mineras tienen carácter permeable y reciben recarga exterior por infiltración de agua de lluvia, se origina una circulación del agua subterránea desde dichas formaciones hacia el hueco minero, creándose así unos mecanismos artificiales de drenaje del sistema hidrogeológico. Así, las labores mineras constituyen captaciones complejas y extensas que drenan los tramos acuíferos vinculados a ellas (Arquer *et al.*, 2006) con intensidad variable, según su conductividad hidráulica y transmisividad (parámetros hidrogeológicos que caracterizan un nivel acuífero). Esta descarga tiene como resultado un descenso del nivel piezométrico del acuífero y puede llegar a causar la desaparición de los manantiales asociados. Pese a no ser exactamente el caso de la CCC, por la inexistencia de formaciones claramente permeables, este impacto es bien visible en las zonas donde existió minería de montaña, que provocaron la desaparición de fuentes de muy bajo caudal correspondientes a aquellos niveles de mayor permeabilidad. Si la explotación no continuó en profundidad o se estableció un eficaz macizo de protección, los transversales mineros actúan ahora como drenajes y constituyen numerosos pequeños «manantiales» (muchas veces se ha perdido la «memoria» de estos antiguos transversales mineros) y que se aprovechan para abastecimiento de pequeños núcleos rurales o riegos localizados. Los mayores caudales salen por los antiguos transversales generales que se realizaron en los años 40-50 a nivel del valle. El transversal general más bajo (primer piso) constituye el nivel base de drenaje, de modo que el macizo superior se va drenando, provocando un lento y paulatino retroceso del nivel piezométrico inicial hacia los frentes de avance, a medida que se incrementa el espacio ocupado por las labores (idealmente como se muestra en la Figura 7). Por debajo de las labores de montaña el macizo rocoso permanecerá saturado.

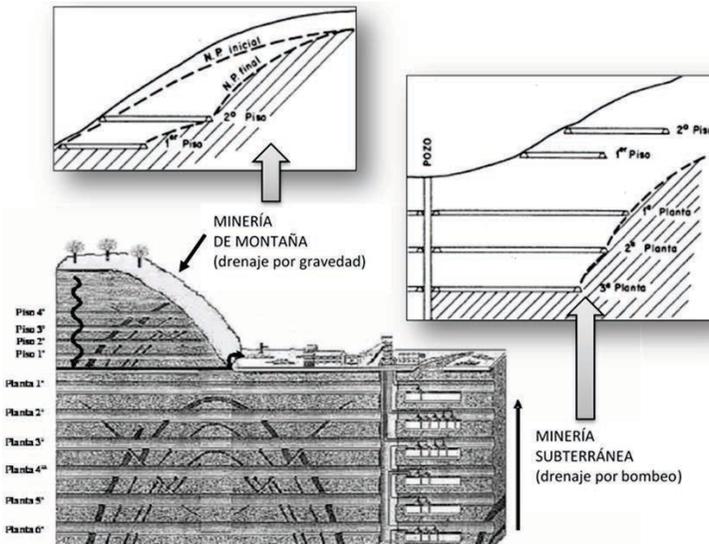


Figura 7. Esquema de la evolución de la minería de carbón en la Cuenca Central Asturiana; drenaje en una explotación de montaña y en un pozo minero (mod. de González y Rebollar, 1986; N.P.: Nivel piezométrico)

En el caso de minería de interior, se hace pues, imprescindible establecer un sistema de bombeo para evacuar el 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). La extracción de agua subterránea puede afectar al caudal base de los ríos próximos o incluso en cambios de la dirección del flujo del agua subterránea, dependiendo 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.*, 2002; Wolkersdorfer, 2008). Las actividades mineras pueden incrementar la permeabilidad de acuíferos suprayacentes, si existen, por lo que resultarán más efectivos para su potencial aprovechamiento posterior. 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, ayudando a mantener su caudal ecológico en épocas de estiaje y diluyendo posibles vertidos de baja calidad (por ejemplo, de aguas residuales). Este es el caso de *aquellos* ríos asturianos que reciben aportes de agua de mina, que *experimentan un aumento de su caudal por este motivo*.

Las explotaciones mediante pozos, de los que parten una serie de galerías a distintos niveles, son desaguados de forma que a medida que van desarrollándose nuevas plantas, el nivel base de bombeo se va desplazando progresivamente hacia la planta más baja, de tal modo que el macizo por encima de esta está drenado, pero por debajo sigue saturado (en función de la depresión del nivel piezométrico generado por el bombeo) (Figura 7). Lógicamente, nunca se produce un drenaje total, ya que en un medio fisurado son normales filtraciones intermedias, puesto que las fracturas constituyen una vía preferente de circulación. No obstante, en el caso de la CCC, las labores mineras no llegan a interferir directamente con acuíferos de entidad, y la baja o muy baja permeabilidad de los materiales a techo y muro de las mismas, hace que la entrada directa del agua de lluvia sea el mecanismo fundamental de entrada de agua al interior de las explotaciones, de forma más acusada en aquellas mejor conectadas con la superficie, por ejemplo a través de fracturas, porque el macizo de protección respetado sin explotar desde la superficie sea poco potente o ineficaz (Arquer *et al.*, 2006). Así, se diferencian minas en las que el caudal de bombeo es elevado, frente a otras que se denominan más «secas». Se pueden citar, a modo de ejemplo, los caudales medios de bombeo (en $\text{hm}^3/\text{año}$) de las siguientes minas (la primera mina metálica y las restantes de carbón), cuando estaban activas: 38 en la mina de Reocín (Cantabria, ya mencionada, las labores interceptaban un acuífero carbonatado), 2,3 en el pozo Figaredo y 1,5 en el pozo Barredo (ambos en Mieres), 1,0 en el pozo Candín y 0,9 en el pozo Fondón (ambos en Langreo) y 0,1 en el pozo Lieres (Siero) (datos facilitados por la empresa minera HUNOSA y Fernández *et al.*, 2008). Además del espesor del macizo de protección y la permeabilidad de los materiales geológicos atravesados, en el caudal infiltrado que será necesario extraer influyen también la extensión de las labores mineras y por tanto, del área de recarga en superficie (desde la cual se puede infiltrar el agua de lluvia hacia el interior de la mina).

Existen algunos estudios hidrogeológicos previos llevados a cabo en minas de carbón, tanto de la CCC, en Mieres (Ordóñez *et al.*, 2009 y 2012), Langreo y San Martín del Rey Aurelio (Álvarez *et al.*, 2016; Loredó *et al.*, 2013; Arquer *et al.*, 2006), Laviana (Ordóñez *et al.*, 2022), Siero (Álvarez *et al.*, 2021), como de El Bierzo (Álvarez *et al.*, 2018). Estos demuestran -como es lógico- una elevada correlación entre la precipitación y el volumen de agua bombeada desde el interior de las labores, tras un tiempo de respuesta (empleado por el agua al descender, desde el momento de la precipitación hasta que es extraída por las bombas de nuevo a la superficie), lo que asemejaría este modelo de «acuífero» a uno de tipo kárstico. Sin embargo, pese a que sí existe una clara relación desagüe/precipitaciones, hay una total independencia entre el desagüe y la ampliación

de las labores mineras o, lo que es lo mismo, de huecos de drenaje, ya que un aumento del volumen de huecos mineros por reprofundizaciones o avance de las labores no afecta sensiblemente al área de recarga. Esto debe interpretarse como la predominancia de aportes directos de agua de lluvia hacia el interior de las labores mineras, con respecto a los aportes en profundidad procedentes de posibles acuíferos interceptados por dichas labores. De modo simplificado *podrían asimilarse los caudales bombeados durante un año hidrológico a la recarga anual aportada por la lluvia*, dada la baja permeabilidad de los materiales geológicos de la CCC. 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 la normativa minera. En la CCC, donde el explotador único es la empresa pública HUNOSA, se dispone de una historia muy completa de estos aforos del desagüe. *El desagüe total en los pozos de HUNOSA es del orden de 37 hm³/año* (Jardón, 2010).

De forma análoga, las minas a cielo abierto inevitablemente intersectan el macizo en torno al mineral según profundizan, por lo que el hueco generado o *corta minera* ha de ser drenado mediante bombeo cuando su profundidad alcanza el nivel piezométrico del acuífero o acuíferos interceptado(s), de forma que dicho hueco se mantenga en seco. En un acuífero libre, cualquier excavación bajo el nivel freático traerá, en mayor o menor magnitud, filtraciones de agua hacia la misma, perjudicando las condiciones de trabajo en la excavación y la estabilidad de los taludes, por lo que es mejor drenar antes de excavar para evitar la rotura plástica. Suelen gestionar mayor volumen de agua por tonelada de producto que las minas subterráneas.

3.3. Inundación de los huecos mineros

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 (*groundwater rebound* en inglés), cuya nueva posición puede no coincidir con la original (Younger *et al.*, 2002). Tras la actividad minera y el cese del bombeo, el nivel de agua en el interior de la mina irá ascendiendo y el comportamiento del sistema hidrogeológico local puede verse modificado, como consecuencia de la posible interconexión entre acuíferos, la generación de un «nuevo acuífero minero» o la conexión entre aguas superficiales y subterráneas.

Como quiera que el bombeo de las aguas infiltradas supone un importante cargo económico para las empresas mineras –especialmente una vez finalizada su actividad extractiva–, sería deseable el cese del bombeo en las minas subterráneas cerradas, procediéndose a la inundación del hueco minero. Esta solución es viable, por ejemplo, en el pozo Sorriego (El Entrego), pero no es siempre aplicable, debido a la singularidad de las explotaciones y las interconexiones creadas –a veces– durante cientos de años de minería. Se volverá sobre este punto en el siguiente apartado.

En el caso de minería a cielo abierto, cuando el hueco (*corta*) no es rellenado, por ejemplo, con estériles de mina, este permanecerá indefinidamente. Si se ha explotado bajo el nivel piezométrico, al cesar el bombeo se producirá una inundación gradual hasta equilibrarse este con el nivel local, formándose un «lago minero» (*pit lake*). Estos lagos son generalmente perennes y se planean como parte del proceso de clausura de una mina, con varias posibilidades de aprovechamiento: hídrico, energético, ecológico (por ejemplo, como hábitat de fauna), recreativo, etc., si la calidad del agua lo permite, para lo cual resulta clave la velocidad de inundación. Se puede citar la inundación de la *corta* de la mina de Reocín (Cantabria). En 2004 se inició la inundación y pese a que se preveía

una deficiente calidad del agua cuando esta alcanzase la cota de rebose, esto no se ha cumplido debido a la dilución con agua poco mineralizada del acuífero y el carácter carbonatado de la roca encajante que neutraliza la posible acidez que genere la oxidación de sulfuros (Fernández *et al.*, 2008). La superficie en planta del lago supera las 30 ha. Otros ejemplos de lagos mineros de explotaciones de carbón son los de las minas de Puentes de García Rodríguez («As Pontes»; Figura 8) y Meirama (ambas en La Coruña). La primera, tras estar 31 años en funcionamiento, fue la mayor explotación a cielo abierto de España y el lago resultante actual, con una capacidad de 547 hm³, constituye el lago artificial más profundo de Europa (18 km de perímetro, 800 ha de superficie y una máxima profundidad de 300 m). Para llenar la corta, junto con la lluvia se contó con parte del caudal del río Eume que se desvió por un canal de 3 km (Rivas *et al.*, 2006). Por su parte, la mina de Meirama explotó lignito durante 27 años y en 2008 el hueco minero comenzó a inundarse con agua de lluvia y subterránea, hasta que Augas de Galicia concedió permiso para aprovechar los caudales del río Barcés y otros arroyos para tal fin. Con una superficie de 110 ha, el lago de Meirama tiene una profundidad de 205 m y una capacidad de 148 hm³ (Juncosa *et al.*, 2016). Como ejemplos en Europa, entre otros muchos se puede citar la mina de lignito Garzweiler (Alemania), que para su cierre, previsto para 2045, constituirá el segundo mayor lago de Europa, así como el lago minero de Senftenberg (Alemania), declarado Reserva Natural, con una superficie de 13 km², 7 km de playas y agua de muy buena calidad.



Figura 8. Lago minero de As Pontes (A Coruña) (Minería sostenible de Galicia, 2022)

Asimismo, con cierta frecuencia las balsas mineras, pequeñas cortas y huecos generados en el pasado durante la actividad minera por diversos motivos, han terminado constituyendo áreas inundadas con niveles de agua poco profundos (humedales antrópicos), como por ejemplo las lagunas de Silva (Tapia de Casariego), antiguas cortas romanas para la explotación de oro (Ordóñez y Álvarez, 2021). En ocasiones estos humedales constituyen reservas de fauna y adquieren valor ambiental y paisajístico. Es el caso del Blesbokspruit wetland en Sudáfrica.

3.4. La formación del «embalse minero subterráneo»

Como ya se ha mencionado, el cese del bombeo conduce al ‘rebote’ del nivel piezométrico: el nivel piezométrico se irá recuperando 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. Teóricamente, 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 (galerías, pozos). Este proceso produciría primero el llenado total de las labores mineras y, transcurrido un pequeño lapso de tiempo, la saturación de los tramos litológicos permeables conectados con dichas labores. La velocidad del proceso de inundación dependerá de la extensión de las labores mineras y, por tanto, del volumen de huecos a rellenar, en relación al volumen de agua infiltrada (Arquer *et al.*, 2006). Por ejemplo, en las plantas habrá un elevado volumen de hueco por unidad de altura inundada.

Si no se reanuda el bombeo, el agua saldrá a superficie a través de la *bocamina* (entrada a las labores) situada a menor cota o bien a través de algún tramo permeable conectado con los huecos mineros a cota inferior (surgencia superficial) y, si estas surgencias son incapaces de evacuar la totalidad de agua de lluvia filtrada, el agua acabará rebosando por otras bocaminas o el brocal del pozo.

En ocasiones, no es posible abandonar el bombeo, permitiendo el restablecimiento del equilibrio piezométrico, para evitar posibles inundaciones en zonas donde actualmente existen obras civiles y que no existían al comienzo de las actividades mineras, hecho incrementado en ocasiones por la existencia de subsidencia minera, por lo que es necesario continuar con el bombeo, *asegurando que el nivel piezométrico se mantenga a una cota segura* (Figura 9), *pero esto supone un coste perpetuo*.

En este caso, si se gradúa el bombeo 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 y se tendrá un volumen almacenado de agua equivalente al de los huecos rellenos, es decir se tendrá un *embalse minero subterráneo*. Cuando $R/D < 1$, evidentemente tiene lugar un descenso progresivo del nivel de inundación, y si sucediese que $R/D > 1$, volvería a continuar esta. Cuando el agua de este embalse subterráneo se esté aprovechando para algún tipo de uso, 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 modificaciones temporales del nivel piezométrico. No obstante, es posible mantener una cota máxima de seguridad, mediante un sistema de sensores, de modo que se active el bombeo al alcanzar determinada profundidad.

Resulta fundamental estimar la capacidad de este «embalse», lo que necesita un análisis riguroso de los huecos abiertos, en función de la historia minera y de las interconexiones con labores mineras adyacentes que hacen que un pozo no constituya frecuentemente un sistema aislado. Este embalse subterráneo no es solo un receptor pasivo de infiltración de agua de lluvia, sino que, al igual que los embalses superficiales, se puede regular mediante las descargas, es decir mediante el bombeo, o incluso inyectando agua según convenga, permitiendo su utilización para diversos fines: aprovechamiento de las aguas para suministro a las poblaciones cercanas, refuerzo de los caudales de estiaje en los ríos cercanos a fin de mantener el caudal ecológico, incluso como túneles de tormenta, etc.

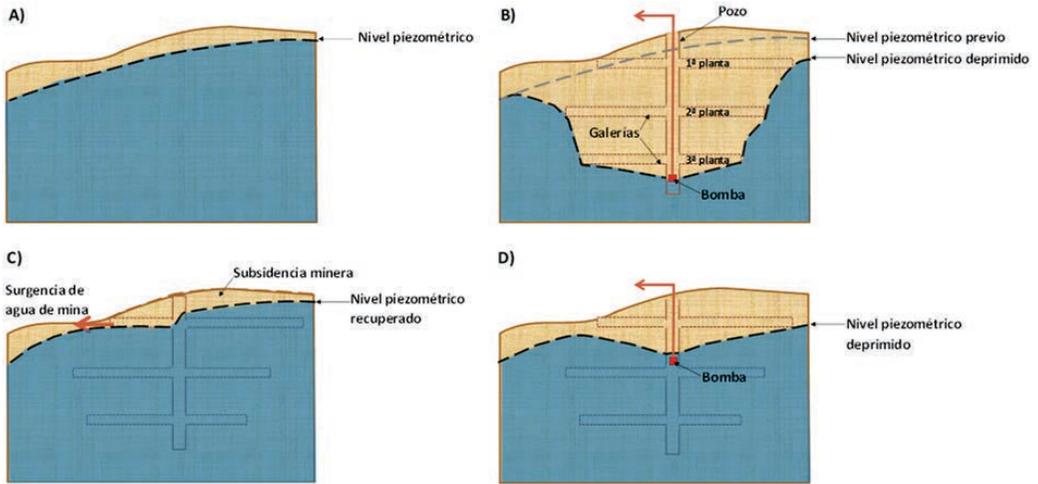


Figura 9. A) Situación previa a las actividades mineras; B) Desarrollo de la minería subterránea con bombeo permanente; C) Cese de la actividad minera e inundación de las labores al interrumpir el bombeo (formación del «embalse minero»); D) Se reanuda el bombeo para evitar surgencias indeseadas de agua de mina en superficie

3.5. Caracterización hidrogeológica del embalse minero

En primer lugar, es necesario determinar el volumen de agua bombeado en la explotación minera durante su actividad (antes del proceso de inundación), que se corresponde con la infiltración (recarga) a las labores, y que, una vez cesa el bombeo, irá rellenando los huecos y formando el embalse minero. La capacidad del embalse se puede estimar a partir de los huecos generados al extraer el mineral y en función de las características de la explotación. Estimada la recarga y el volumen de huecos será posible estimar el tiempo necesario para completarse la inundación, lo cual permite a la compañía minera estar preparada con antelación. Resulta fundamental que el proceso de inundación sea monitorizado en el tiempo (control en continuo del ascenso del nivel piezométrico) para contrastar el volumen de agua infiltrada con el volumen de huecos previamente estimado. Conocer el volumen de huecos o capacidad del embalse subterráneo será imprescindible para su control, regulación y aprovechamiento. Por otra parte, es conveniente establecer un *modelo conceptual hidrogeológico* basado en un balance de entradas de agua (infiltración de lluvia, aporte desde acuíferos, pérdidas de agua desde un río) y salidas de agua (bombeo, escorrentía) del sistema. Resulta útil modelizar el proceso de inundación mediante software específico, como el 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 (Kortas y Younger, 2007).

3.5.1. Estimación de la recarga del embalse

Como ya se ha explicado, la precipitación llega al interior de los pozos por infiltración a través de los huecos de los terrenos minados suprayacentes, generando un volumen de agua que habrá de ser bombeado al exterior durante la vida activa de la explotación. Por ejemplo, el caudal medio de agua bombeada (infiltrada) en los pozos Barredo y Figaredo era de 1,5 y 2,6 $\text{hm}^3/\text{año}$, respectivamente, lo que hace un total de 4,1 $\text{hm}^3/\text{año}$ (130 l/s) para el embalse minero constituido por las labores mineras de ambos pozos, comuni-

cados entre sí por conexión franca, pero independientes de las labores de otros pozos próximos como San José, por lo que se considera un sistema hidrogeológicamente aislado (Jardón, 2010). La recarga del conjunto de todos los pozos de HUNOSA, como ya se ha indicado en el apartado 3.2. de este documento, es de 37 hm³/año.

Según estudios previos en la CCC (Convenio HUNOSA-IGME-UNIOVI, 2008), se conoce que el tiempo medio de permanencia del agua de lluvia en minas de montaña está comprendido entre 4 y 10 días. En el caso de los pozos mineros se estiman tiempos de retención de entre 15 y 45 días, siendo variable en función de las características del pozo, el macizo entre la superficie y el área deshullada y otros factores que pueden afectar a la infiltración. En el caso del embalse Barredo-Figaredo, este tiempo de respuesta (entre la precipitación y el bombeo) se ha estimado en 19 días, como valor medio. Se considera *lluvia útil* o efectiva a la resultante de restar a la precipitación total las pérdidas hacia la atmósfera por evaporación y transpiración; esta lluvia útil generará, sobre el terreno, infiltración y escorrentía superficial. Siguiendo con el ejemplo, al comparar el caudal bombeado con la lluvia útil ocurrida 19 días antes, se deduce que la infiltración (recarga) al embalse Barredo-Figaredo se puede obtener muy aproximadamente como un 23% de la lluvia útil, al que se suma una constante de 61 l/s, no supeditada al aporte pluvial sino procedente del río Turón (Ordóñez *et al.*, 2012). Para cada embalse minero, serán diferentes los valores de recarga y tiempo de retención del agua en su interior.

3.5.2. Cálculo de la capacidad del embalse

Se trata de estimar el volumen de huecos, susceptibles de llenarse de agua del embalse minero. Además del total, interesa el volumen útil, que vendrá definido por la cota de seguridad que se establezca como de inundación máxima del embalse. El hueco útil bajo la cota final del agua vendrá definido por los huecos mineros residuales. Estos huecos pueden clasificarse en:

- Huecos generados en la extracción de mineral. En el caso del carbón, se ha de diferenciar el tipo de explotación: relleno (el tonelaje se ha extraído rellenando posteriormente los huecos) y hundimiento (se produce un colapso del techo que va produciendo sucesivos colapsos en los huecos producidos hasta su estabilización). El hueco útil será el resultante de multiplicar el volumen deshullado (volumen de carbón extraído) por dos coeficientes diferentes, según el tipo de explotación, que suponen la reducción porcentual del hueco inicial abierto. Para estimar dichos coeficientes se puede recurrir a fórmulas recogidas en la bibliografía especializada (Rogoz, 1978; Degas *et al.*, 2003, etc.) y la opinión de expertos. El ingeniero de minas y catedrático de la Universidad de Oviedo J. Toraño sugiere que «*en el caso de explotación por relleno, el hueco depende del tipo de relleno del que se trate; si es escombros de lavadero, puede ser del 10%, pero si se trata de estériles de mina (roca), se sitúa entre el 40-50%, pudiendo llegar incluso al 0% si 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*»
- Huecos de las galerías de acceso. Se obtendrían multiplicando su sección útil por la longitud total.
- Huecos en los embarques y lazos de maniobra y huecos de las cañas de los pozos de extracción.

Para conocer las toneladas de mineral arrancadas por cada nivel puede recurrirse a ar-

chivos históricos, pero puede resultar una tarea complicada, especialmente en minas antiguas. En el embalse Barredo-Figaredo el agua ascendió a una velocidad media de 1 m/día y tardó aproximadamente un año en completar la inundación hasta la cota de seguridad establecida. Este periodo es variable para cada embalse y depende de su volumen de huecos y su capacidad de recarga (así como el régimen de precipitaciones); el embalse Candín-Fondón (Langreo) tardó casi 5 años en inundarse y la mina de Lieres (Siero), se demorará mucho más, dada la baja recarga que recibe (mina «seca»). Una vez terminado el proceso de cálculo y contrastado con el agua infiltrada durante la inundación al embalse Barredo-Figaredo se le estima una capacidad de $5,8 \text{ hm}^3$ (hasta cota +150 m.s.n.m.), mientras que para el total de los pozos de la CCC se estiman unas reservas de unos 80 hm^3 (y unos recursos de $37 \text{ hm}^3/\text{año}$), lo que *representa un embalse considerable*.

3.5.3. Modelo conceptual

La cuenca de afección del embalse minero, que incluye las labores mineras y el área alterada, rodeadas por el macizo inalterado y prácticamente impermeable, que hace que el sistema se pueda asimilar, de forma simplificada, a una «caja» en la que no se consideran aportes laterales de agua, siendo la recarga superficial el único aporte de agua significativo al sistema (Figura 10A). En la recarga se ha de incluir la procedente de los cauces de agua superficial que atraviesan esta cuenca y puedan perder parte de su caudal como infiltración al embalse minero. Particularicemos para el caso simplificado del embalse Barredo-Figaredo (Figura 10B): considerando que las únicas salidas del sistema son los caudales desaguados por ambos pozos (E_B y E_F), y las entradas corresponden a la infiltración de lluvia útil ($P_{\text{útil}}$, que es igual a la diferencia entre precipitación total (P) y pérdidas por evaporación y transpiración (ETR)) y las pérdidas de caudal del río (I_r), se puede realizar un balance hídrico para un año medio durante la fase activa de la mina. La infiltración a las labores corresponde a la suma de la infiltración procedente de la lluvia útil (I_p ; aproximadamente el 23% de esta) y la procedente del río (I_r) y coincide con el total desaguado por ambos pozos ($E_B + E_F$). La diferencia entre $P_{\text{útil}}$ e I_p generaría escorrentía superficial.

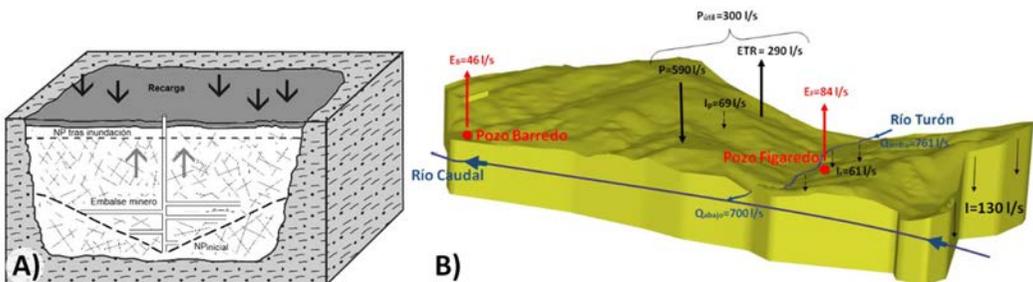


Figura 10. A) Esquema de funcionamiento de un embalse minero que encaja en materiales de muy baja permeabilidad, tras el cese de bombeo;
B) Modelo de balance hídrico

3.6. Calidad del agua de mina

El agua de cada mina va a tener su hidroquímica característica. Aunque los principios que intervienen en la definición de la calidad del agua de mina son universales, los rasgos locales de geología, mineralogía, clima, método de explotación, etc., van a influir en las reacciones que ocurran. Si entre los constituyentes minerales no hay bisulfuros (p. e. FeS_2) o pirrotina (Fe_{1-x}S), no habrá aguas ácidas. Aún en ese caso, puede haber enriquecimiento en metales. Pero si no hay acidez, ni movilización de metales, ni sales solubles, las aguas pueden estar dentro de los límites regulatorios, o incluso ser aptas para uso potable (Wolkersdorfer, 2008). *Es el caso del agua de la mina de montaña Mariana (Mieres), entre otras.*

La actividad minera 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 yacimientos que puedan contener sulfuros (minería metálica, de carbón o de uranio) puede resultar 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 (sulfuro más abundante de la corteza terrestre), a menudo frecuente en estos yacimientos, entran rápidamente en solución (Younger *et al.*, 2002). Las aguas entonces adquieren bajos pH y altas concentraciones de sulfatos y hierro, así como otros metales, puesto que su acidez incrementa su capacidad de disolución. La alteración de la calidad de esta agua puede variar de leve a severa, dependiendo de la reactividad del mineral y la capacidad de neutralización de las formaciones geológicas adyacentes, entre otros factores, pudiendo incluso producirse impactos ecológicos que persistan durante décadas (Younger, 1997). El tratamiento de este tipo de descargas ha sido objeto de profuso estudio y numerosas publicaciones (Watzlaf *et al.*, 2004; PIRAMID Consortium, 2003; Hedin *et al.*, 1994 y Kleinmann, 1985, entre otros). *En el caso concreto de la Cuenca Central Asturiana, el bajo contenido de sulfuros en el carbón, así como la presencia de materiales carbonatados que actúan como tampón, hacen que el problema de la generación de aguas ácidas y ferruginosas sea muy reducido, si se compara con el sufrido en otras áreas carboníferas como las del Nordeste de Inglaterra o el Este de Estados Unidos.*

La existencia de sulfuros entre los minerales presentes en el área de explotación minera puede dar por tanto lugar a un incremento del contenido en hierro y sulfatos y en las aguas de mina tras la fase de inundación, que se mantendrá durante un tiempo para ir decreciendo posteriormente. Una vez inundados los huecos, los minerales no están sometidos a oxidación y los efectos durarán mientras dure ese lavado inicial (a este fenómeno se le conoce como *first flush* y dependiendo del caso puede llegar a durar años o incluso décadas), así como la oxidación en la franja superior en la que oscila el nivel de agua. La duración de este primer lavado suele durar *entre 3 y 5 veces el tiempo empleado en la inundación de la mina*. La siguiente figura muestra la evolución del contenido en hierro y sulfatos del agua del pozo Barredo (Mieres) desde 2005 a 2016 (cortesía de HUNOSA; Loredó, 2017; Martos, 2014). Aunque existen lagunas de muestreo, es evidente que el contenido de ambos iones aumenta durante la inundación de la mina (las aguas pasan de ser bicarbonatadas sódicas a sulfatadas cálcico-sódicas). Con la reanudación del bombeo, estas concentraciones experimentan un declive gradual, lo que indica la recuperación de la calidad del agua a niveles previos a la inundación en un periodo de unos 5 años, lo cual encaja con la anterior estimación, ya que la inundación de del embalse minero se prolongó durante aproximadamente un año (Loredó *et al.*, 2017).

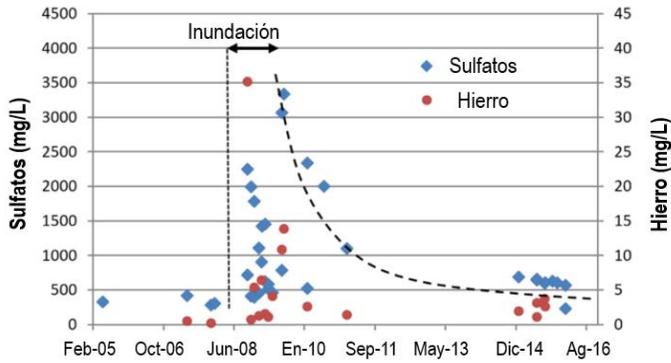


Figura 11. Evolución temporal de los contenidos en sulfatos y hierro del agua del pozo Barredo (Loredo et al., 2017)

El agua almacenada en los embalses y lagos mineros suele experimentar una estratificación química, de forma que, con la profundidad, la alcalinidad y el pH se reducen, mientras aumenta el contenido en metales y el grado de mineralización. Las aguas que se infiltran desde la superficie, 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 romperse cuando se produce una alteración por bombeo (que favorece la mezcla de aguas) o al alcanzar una salida del sistema, como una antigua galería (Wolkersdorfer, 2008; Nuttal y Younger, 2004). La mayor parte de las aguas de mina de la CCC tienen pH circumneutral (suelen ser bicarbonatadas), pero algunas pueden tener un alto contenido metálico (hierro, manganeso) y en ciertos casos se ha podido observar la estratificación química con la profundidad (Loredo et al., 2017). Por otra parte, algunas de estas aguas presentan elevada dureza (relacionada con su contenido en calcio y magnesio) y esto puede generar problemas de incrustación en conducciones y equipos. Resulta útil, si es factible, realizar un muestreo y medidas de parámetros en profundidad, dentro del embalse minero, para definir perfiles hidroquímicos. De esta forma es posible caracterizar la estratificación química del agua en el interior de labores mineras, la influencia de las comunicaciones entre pozos, los tiempos de flujo, etc., pero se trata de un proceso delicado y costoso, debido a la profundidad que se debe alcanzar ya que las sondas de medida habituales no resisten la presión correspondiente. En 2019, un equipo de la Technische Hochschule Georg Agricola, (Bochum, Alemania), dirigido por el profesor Christian Wolkersdorfer, experto internacional en aguas de mina, realizó un ensayo de este tipo en el pozo Entrego (San Martín del Rey Aurelio), que está comunicado con el pozo Sorriego y tiene 400 m de profundidad. Se tomaron muestras de aguas y se realizaron medidas de parámetros como pH, conductividad eléctrica y temperatura a lo largo del pozo.

En lo que se refiere a la temperatura del agua en el interior del embalse minero, esta se incrementa con la profundidad, de acuerdo con el gradiente geotérmico. El agua de mina se bombea desde el pozo de Barredo (a 100 y 200 m de profundidad) a más de 22°C. Según los perfiles térmicos medidos por HUNOSA dentro de este pozo, las secciones superiores muestran variaciones estacionales de temperatura, mientras que la temperatura es más estable en la parte inferior de la mina, aunque también se acusan cambios al atravesar las plantas del pozo.

Existen afecciones negativas a aguas superficiales y subterráneas derivadas de antigua actividad minera desarrollada en épocas pasadas, cuando la conciencia ambiental no era la actual. Es el caso de las antiguas minas de mercurio de nuestra región, cerradas en los años 70 del pasado siglo y cuya influencia (por ejemplo, a partir de escombreras no restauradas) aún se deja notar en los cauces aguas abajo de las minas. Esto ha sido objeto de numerosos trabajos desarrollados por el Grupo de Investigación ISYMA de la Universidad de Oviedo y se estudia actualmente en el marco del proyecto FLUCOS, citado en el apartado de Introducción de este documento. Cabe hacer notar que actualmente las operaciones mineras se deben ajustar a una legislación muy exigente en lo que se refiere a la gestión de aguas. Por ejemplo, las plantas de tratamiento mineral suelen trabajar en circuito cerrado, con «vertido cero», la calidad del agua implicada en todas las fases mineras es estrictamente controlada y se utilizan las tecnologías más punteras para el tratamiento del agua, si es necesario. Como es lógico, tanto durante como tras la actividad minera, esto debe cumplirse escrupulosamente.



La economía circular

Se trata de un concepto íntimamente relacionado con la sostenibilidad, que busca «*alcanzar una sociedad más eficiente en el uso de los bienes, que utilice como recursos aquellos residuos que no puedan ser evitados, siempre que sea técnica y económicamente posible*». En un contexto de escasez de materias primas y problemas medioambientales, se hace necesario utilizar los recursos de forma eficiente y gestionar los residuos para contribuir a una economía circular, según un modelo sostenible en el que los residuos se minimizan y si es posible se reincorporan al proceso productivo. Este modelo supone un cambio de paradigma que supone un reto, pero a la vez pretende conseguir mejoras ambientales y estimular el crecimiento económico. Se calcula que la puesta en marcha de medidas como la minimización de residuos o la reutilización de recursos, entre otras, podrían suponer un ahorro en la Unión Europea de 600.000 millones de euros, aumentando el PIB y generando empleo, al a vez que reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero en más de un 2% (Oria, 2022; Fundación Humana, 2017).

La Comisión Europea presentó en 2015 el Plan de Acción denominado «Paquete de Economía Circular» y en línea con el objetivo de neutralidad climática de la UE para 2050 en virtud del Pacto Verde, la Comisión Europea propuso en marzo de 2022 el primer paquete de medidas para acelerar la transición hacia la economía circular, como se recoge en el *Plan de Acción de Economía Circular*. La Estrategia Española de Economía Circular (EEEC; *España Circular 2030*) sienta las bases para la promoción de un nuevo modelo de producción y consumo, en el que el valor de los recursos (materias primas y productos) se conservan en la economía durante el mayor tiempo posible, al tiempo que se reduce la generación de residuos y se aprovechan mejor aquellos que no se pueden evitar, con el fin de *alcanzar -de forma competitiva- eficiencia y sostenibilidad*. Dentro de los objetivos de esta Estrategia, se destacan los siguientes: reducción de la generación de residuos, incrementar la reutilización, mejorar la eficiencia en el uso del agua y reducir la emisión de gases de efecto invernadero. Asimismo, la EEEC impulsa la elaboración de

sucesivos planes de Acción de Economía Circular, con una serie de medidas agrupadas en ejes de actuación, entre los que se pone la atención sobre el siguiente: «*Reutilización y depuración del agua*»: *promover un uso eficiente del recurso agua, que permita conciliar la protección de la calidad y cantidad de las masas acuáticas con un aprovechamiento sostenible e innovador del mismo* (MITECO, 2022b). El Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE) de Economía Circular, aprobado en 2022, activará ayudas a empresas en las líneas de gestión hídrica y energías renovables.

4.1. La economía circular del agua

En el sector del agua, el concepto de economía circular se concreta en reutilizarla, tal como sucede en el ciclo hidrológico, por ejemplo, mediante la regeneración o el aprovechamiento de las aguas residuales o utilizando los efluentes industriales para así reducir el impacto de la actividad y ahorrar costes (Melgarejo, 2017).

Como ejemplo del primer caso, se puede citar el proyecto «Aprovechamiento térmico (hidráulico) de aguas residuales urbanas», realizado por dos alumnos de la Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo, que obtuvo el primer premio del concurso internacional EDPR University Challenge en 2019. Por medio de *bombas de calor* (equipos que transfieren calor desde un foco a otro a mayor temperatura utilizando un gas refrigerante en un ciclo termodinámico cerrado), es técnica y económicamente posible utilizar el calor de las aguas residuales, ahorrando energía y transformando un residuo en un recurso susceptible de aprovechamiento sostenible. Una vertiente es el aprovechamiento térmico del agua residual en el interior de los colectores, ya que las redes de saneamiento urbanas del s. XXI deben ir más allá de simplemente transportar las aguas residuales y es factible cubrir las necesidades energéticas para climatización de edificios próximos a las canalizaciones, reduciendo el consumo de combustibles convencionales. En particular, en el entorno del colector de la parte baja de la ciudad de Oviedo (Ventanielles), una instalación con una bomba de calor de 2 MW podría dar calefacción a varios edificios próximos y permitiría ahorrar la emisión anual de más de 500 t de CO₂, con una inversión recuperable antes de 10 años. Otra vertiente, también muy interesante desde el punto de vista financiero, se centra en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), a las que llega un mayor caudal de agua residual, y que consiste en un aprovechamiento tanto térmico como microhidráulico del agua tratada. El agua residual constituye una fuente urbana de suministro fiable, segura, económica y respetuosa con el medioambiente, enmarcada dentro de la economía circular.

Por otra parte, resulta fundamental el *agua regenerada* (agua residual depurada) como recurso estable (procede del agua de abastecimiento urbano y su caudal está garantizado), ya que la reutilización de aguas depuradas tiene innumerables ventajas ambientales. Está demostrado que un efluente secundario de una EDAR puede convertirse, con el adecuado tratamiento, en agua regenerada de calidad «analíticamente potable» y además resulta más económico que las aguas obtenidas mediante trasvases o desalinización, porque su producción consume menos energía. Su calidad es suficiente para la mayoría de los usos del agua, destacando el regadío (agrícola, jardines, campos de golf, etc.) que además se beneficia del contenido en nutrientes del agua, los usos industriales, urbanos (baldeo de calles, extinción de incendios, lavado de coches, fuentes ornamentales, etc.) y recreativos, el mantenimiento de los caudales ecológicos de los ríos y algo tan interesante como la *recarga artificial de acuíferos*. El primero que tuvo la idea de una verdadera realimentación fue Thiem en 1888 y puso en práctica su procedimiento inyectando aguas del Ruhr en sus propios aluviones (Hevia, 1973). Esta práctica consiste en inyectar agua en los acuíferos a través de pozos o balsas y permite luchar contra la sobreexplotación de acuíferos, crear barreras contra la intrusión salina en acuíferos costeros, restaurar

humedales, mejorar la calidad del agua del acuífero, por ejemplo rebajando su salinidad, atenuar los efectos de la subsidencia debida a la extracción de agua y utilizar el acuífero como red de distribución, aprovechando la mayor fiabilidad y protección de los acuíferos como embalses naturales (esto se denomina *Aquifer Storage and Recovery* o ASR). Esta tecnología está desarrollada en países como Israel, USA, Australia y países del Norte de Europa, pero en España las experiencias de recarga son más limitadas. Paradójicamente, los requisitos para la recarga artificial de acuíferos son tan estrictos en nuestro país que no los cumplen ni el agua de lluvia ni la del grifo y para alcanzarlos puede ser preciso un tratamiento muy costoso (Carrera, 2018).

España fue de los primeros países en el mundo que estableció una reglamentación para el uso del agua regenerada y cada vez con más frecuencia el agua se trata y regenera para su uso, especialmente para riego y sobre todo en el área mediterránea, Madrid, Cataluña y los archipiélagos. Aproximadamente un tercio del volumen reutilizado de aguas residuales de la UE se realiza en España, que posee el mayor potencial de reutilización de Europa. El Plan Nacional de Calidad de las Aguas fija un objetivo de volumen reutilizado (1200 hm³/año para 2025), lo que representa el 25% de las aguas residuales depuradas en el país, pero actualmente reutiliza menos del 10% del total. Según el EC Joint Research Center, *«la reutilización del agua ha dejado de ser una fuente alternativa de suministro, para pasar a ser la fuente de suministro de agua»*, ya que está llamada a convertirse, junto a la desalinización, en una fuente fiable de recursos hídricos en un futuro próximo.

En términos generales, *«la economía circular del agua pretende convertir el agua ya usada en una nueva fuente del recurso»* (Melgarejo, 2017). En esta línea, se presentan en este documento *algunas posibilidades de aprovechamiento sostenible del agua de mina (y los huecos mineros), de forma que algo habitualmente considerado como un residuo se transforma en un recurso, al darle una segunda vida, lo que resulta de particular interés en antiguas áreas mineras en declive.*

4.2. El agua de mina como recurso hídrico

Dada la proximidad de los embalses mineros a núcleos de población, se contempla la viabilidad del aprovechamiento de este agua como recurso hídrico, es decir, como posible fuente de suministro de agua a determinados usos.

Como ya se ha explicado, una vez que ha finalizado la actividad extractiva, en muchos casos (por ejemplo en muchos pozos de la CCC) es necesario mantener un nivel de seguridad del agua subterránea para no inundar zonas urbanizadas. Esta cota de seguridad se logra mediante bombeo, lo que implica un esfuerzo económico muy notable en forma de energía eléctrica. La pregunta entonces es inmediata... ¿Se podría aprovechar este agua, ya que de todas formas persiste esa servidumbre de bombeo? La calidad del agua de mina va a condicionar si es preciso y en ese caso el tipo de tratamiento físico-químico necesario para que sea apta para consumo humano (siempre va a ser necesaria al menos una desinfección), así como el coste que tal tratamiento supone. De cualquier modo, siempre es posible aprovecharla para usos menos exigentes. Un número considerable de aguas de mina tienen la calidad suficiente como para ser usadas para abastecimiento (potable) y muchas más tienen la suficiente calidad para cubrir demandas industriales o agrícolas, entre otras, así como para su aprovechamiento energético, como se verá más adelante.

El aprovechamiento hídrico de un embalse minero está justificado por las siguientes razones:

- Utilidad ecológica: Cuando las minas estaban en explotación, el bombeo suministraba un caudal que era vertido a un río próximo. El aprovechamiento hídrico del embalse facilitaría el mantenimiento del caudal ecológico de dicho río, incrementando su caudal con agua subterránea, lo que resultaría especialmente útil en épocas de estiaje.
- Capacidad: el volumen de huecos inundados en los embalses mineros puede ser considerable, comparable al de algunos embalses superficiales y la infraestructura no tiene coste, porque ya está construida. Por ejemplo, la capacidad del embalse subterráneo Barredo-Figaredo de $5,8 \text{ hm}^3$, ya comentada, es significativa e incluso podría duplicarse si se hiciesen francas las comunicaciones entre las labores del pozo Figaredo y las del pozo próximo San José, algo técnicamente viable.
- Infraestructura: la proximidad de los embalses mineros a las redes de abastecimiento de Asturias puede propiciar una posible conexión entre ambos, que no sería demasiado costosa, pero sí beneficiosa para cubrir demandas, obviamente tras el necesario tratamiento de las aguas de mina.
- Relación con el aprovechamiento energético: existe la posibilidad de combinar la utilización energética (por ejemplo, geotérmica) del embalse con el uso hídrico, devolviendo los caudales utilizados en dicho aprovechamiento al embalse, lo que posibilita además su aprovechamiento microhidráulico para generar electricidad, como se mencionará.
- Regulación: se puede jugar con el volumen disponible de embalse, para almacenar agua en época de mayor recarga y extraer en época de déficit, inyectando o extrayendo agua según convenga, análogamente a un embalse superficial. La recarga del embalse podría incrementarse incluso mediante la inyección de agua externa (por ejemplo, de un río cercano), permitiendo una mejor regulación y aprovechamiento.

Tomemos como ejemplo el embalse Barredo-Figaredo (Mieres): su recarga media es de $4,1 \text{ hm}^3/\text{año}$, que sería el consumo máximo que se podría satisfacer con regulación (es decir, almacenando en el embalse cuando hay superávit). Esta cifra sería teóricamente suficiente para abastecer a unas 60.000 personas, suponiendo un consumo constante de 185 l por habitante y día. Se tiene, pues, que el embalse podría satisfacer la demanda teórica de no solo la ciudad de Mieres (22.700 habitantes), sino también sobradamente la de todo el concejo homónimo (38.400 habitantes). La recarga no es constante a lo largo del año; 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, Figura 12A), de no existir regulación, no sería posible el abastecimiento, mientras que de enero a mayo, habría excedentes. La regulación mediante el embalse subterráneo garantizaría que el volumen almacenado en ese tiempo compensase las deficiencias en el tiempo restante, con una garantía de suministro del 100% (Figura 12B). También se deduce que un volumen de embalse de $0,6 \text{ hm}^3$ (muy inferior al realmente existente, un orden de magnitud superior) sería suficiente para regular la aportación media considerada. Aunque la capacidad real del embalse es muy superior, con la recarga natural del este, no sería posible aumentar la demanda satisfecha, a no ser que se aumentase artificialmente dicha recarga, por ejemplo, procedente de un río próximo. Para ello, existe la posibilidad de «importar» durante los seis meses de déficit (2ª mitad del año) un caudal de agua del río Aller de 130 l/s (algo perfectamente asumible por el río, pues su caudal medio es de $6,7 \text{ m}^3/\text{s}$ y su caudal ambiental de unos 700 l/s). Así el embalse recibiría más recarga, para poder llegar a satisfacer el doble de demanda (abastecimiento teórico de 120.000 personas), aprovechando mejor su capacidad. Obviamente, sería necesario incrementar la capacidad de bombeo, que podría concentrarse en horas nocturnas, además de

conocer de forma precisa la infiltración (aportaciones) para años medios, húmedos y secos, lo que es igualmente recomendable si se quiere aprovechar toda la potencialidad geotérmica del embalse.

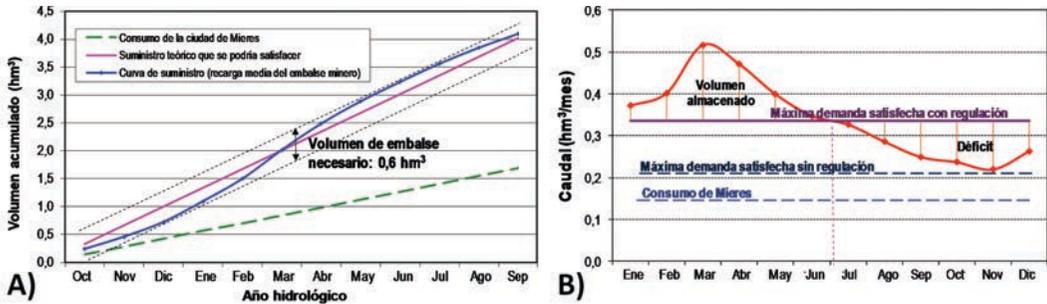


Figura 12. Ejemplo de regulación de embalse minero: A) aportaciones y consumos acumulados para un año hidrológico medio; B) Gráfica caudales clasificados-demanda para el embalse minero (mod. Ordóñez et al., 2012)

Pasemos a otros ejemplos en España de aprovechamiento del agua de mina como recurso hídrico. La inundación de la corta de Lignitos de Meirama para formar el lago minero ya mencionado en el apartado 3.3. de este documento, constituye una de las mayores actuaciones medioambientales en España de los últimos años (Figura 13). Se ubica a 30 km de la ciudad de La Coruña y con su capacidad y la buena calidad de su agua puede abastecer a los 400.000 hogares del área metropolitana de dicha ciudad sin necesidad de una depuración previa. En 2013, Augas de Galicia lo autorizó como reservorio de agua (se conecta a través de una tubería con el embalse de Cecebre, del que hoy beben los coruñeses y cuya capacidad es 7 veces menor), garantizando así el abastecimiento de La Coruña y sus alrededores. En 2021 la empresa Naturgy transfirió el lago al dominio público hidráulico. La restauración del lago y su entorno, ha permitido desarrollar un espacio de gran biodiversidad, en el que un estudio de la Universidad de Santiago identificó en 2017 más de 800 especies, y que además representa un enclave de gran potencial para el turismo (se ha dispuesto una playa, rodeada por una frondosa masa de árboles con espacio para la construcción de embarcaderos) y las actividades deportivas como piragüismo (Minería sostenible de Galicia, 2019).



Figura 13. Lago minero de Meirama (Minería sostenible de Galicia, 2019)

Análogamente, el lago minero de As Pontes, también previamente descrito, dispone de una playa artificial y un enorme volumen de agua dulce almacenada que lo convierte en una de las reservas de agua dulce más importantes del país. Además, cuenta con una calificación óptima del agua para el baño, con una temperatura que se mantiene todo el año en torno a los 19 grados, constituye un ecosistema de gran riqueza biológica y permite la práctica de deportes náuticos, que a su vez generan empleo (Minería sostenible de Galicia, 2022).

4.3. El agua de mina como recurso energético geotérmico

Desde la Revolución Industrial, los combustibles fósiles han sido las fuentes de energía dominantes, tanto en la generación de electricidad como en el transporte y la calefacción. Sin embargo, en los últimos años, las fuentes de energía renovables han ganado importancia con el fin de cumplir con las directrices marcadas en el Acuerdo de París de 2015 y el objetivo de cero emisiones de carbono para 2050. Para alcanzar tal objetivo, las emisiones globales relacionadas con la energía deberían reducirse un 30% por debajo de los niveles de 2019 para 2030, y un 75% para 2040 (BloombergNEF, 2022). Por otro lado, se espera que la demanda mundial de energía crezca más de una cuarta parte hasta 2040 y la actual situación debida a la pandemia de COVID-19 y la guerra en Ucrania no ha hecho sino dificultar la situación. Se espera que esto se logre promoviendo el desarrollo acelerado de fuentes de energía renovables limpias y bajas en carbono y mejorando la eficiencia energética, como se establece en la Directiva (UE) 2018/2002 sobre eficiencia energética. Una perspectiva basada en la configuración actual, muestra un escenario en el que la demanda de combustibles fósiles se desacelera a una meseta en la década de 2030 y luego cae ligeramente para 2050, ya que casi todo el crecimiento de la demanda de energía provendrá de fuentes de bajas emisiones (IEA, 2022).

En esta línea, la geotermia es una energía considerada renovable. Se trata de la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra. Esta energía calorífica se transmite desde sus capas internas y se acumula en rocas, suelos y aguas subterráneas. En particular, el calor de estas puede ser aprovechado por el hombre para calefacción (aguas de baja temperatura) y generar electricidad (aguas de alta temperatura). De hecho, se considera una energía renovable (el calor de la Tierra es ilimitado a la escala humana y estará disponible para las generaciones futuras), de bajo impacto (instalaciones compactas), económica (el coste de inversión de una instalación geotérmica para calefacción es superior al de los sistemas convencionales, pero sus costes de mantenimiento son más bajos y su rendimiento es superior), eficiente (considerada la mejor para calefacción y refrigeración por la agencia medioambiental americana US EPA), disponible (no depende de factores externos como el clima, sino de las características intrínsecas del subsuelo, es regular, continua todo el año y en todos los países y se obtiene localmente, evitando el transporte) y limpia (no contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero). En realidad, las instalaciones que emplean bombas de calor para calefacción, refrigeración y producción de Agua Caliente Sanitaria (ACS) consumen energía eléctrica para el funcionamiento de compresores eléctricos, bombas de circulación y ventiladores del edificio, pero las emisiones son muy inferiores a las de los sistemas tradicionales.

Como ya se ha mencionado, la *bomba de calor* se basa en el principio de transmisión de calor de un medio a menor temperatura (foco frío) a otro que está a una temperatura superior (foco caliente) mediante el aporte de trabajo mecánico. Este intercambio se consigue con el empleo de refrigerantes, que experimentan cambios de fase en un amplia gama de presiones y temperaturas. La bomba de calor suministra más energía útil

(en forma de calor) de la que utiliza para su funcionamiento (energía eléctrica), pudiendo producir un ahorro del 70% respecto a un sistema de calentamiento tradicional como gas, electricidad o gasóleo.

El potencial geotérmico del agua de mina está mundialmente reconocido y es hoy en día objeto de estudio en varias minas situadas por todo el mundo, especialmente en las de carbón (Watzlaf y Ackman, 2006). La temperatura del agua de mina suele ser elevada en función de su profundidad, debido al gradiente geotérmico, y es estable al estar aislada de variaciones estacionales, lo que la capacita para ser empleada en aplicaciones geotérmicas. El *aprovechamiento geotérmico del agua de mina* para climatizar edificios próximos al embalse minero mediante bombas de calor resulta muy interesante, dado el ahorro económico (y de emisiones de gases de efecto invernadero) que ello supone que ello supone, frente al coste de la calefacción y refrigeración convencionales. Aunque la mayor parte de esta investigación no ha cristalizado en sistemas operativos a gran escala, existen algunos proyectos relevantes en funcionamiento en minas de carbón, como el pionero Minewater Project (Heerlen, Países Bajos) (Verhoeven *et al.*, 2014). Una revisión de proyectos en los que se plantea el uso geotérmico de agua se puede consultar en Walls *et al.* (2021), Peralta *et al.* (2015) y Hall *et al.* (2011).

En la primera década del presente siglo, el catedrático ilustre de la Escuela de Ingeniería de Minas de Oviedo, Fernando Pendás, ingeniero visionario, tuvo la idea de realizar un aprovechamiento geotérmico a las aguas de mina de la CCC asturiana. Esta idea fue muy bien acogida por parte de la dirección de Nuevos Desarrollos de HUNOSA y se puso en marcha un convenio entre dicha empresa, la Universidad de Oviedo y el IGME, para estudiar esta y otras alternativas, como el aprovechamiento del metano de las capas de carbón. Estos estudios culminan con el proyecto piloto de abastecimiento de energía geotérmica a las nuevas instalaciones del Campus de Mieres, utilizando las aguas de mina del Pozo Barredo, al que seguirían otros proyectos. Desde entonces, HUNOSA apuesta con gran acierto por este tipo de aprovechamiento y ha implementado sistemas geotérmicos únicos en España, que constituyen un ejemplo a nivel internacional.

El método clásico para estimar la energía geotérmica reservada en un embalse subterráneo se basa en el método volumétrico (Raymond y Therrien, 2008) que permite determinar la energía estática sin considerar la recarga desde las rocas encajantes (Bao *et al.*, 2019). La energía térmica disponible depende del volumen de agua de mina almacenada y la diferencia de temperatura del agua entre la entrada y la salida de la bomba de calor. El almacenamiento de energía estática asociado al agua de este embalse viene dado por:

$$E_s = C_e \cdot \rho \cdot V_a \cdot \Delta T \cdot \eta_c \quad [1]$$

Donde:

E_s = energía estática (kWh)

C_e = calor específico del agua = 4,18 kJ/(kg·°C)

ρ = densidad del agua = 1000 kg/m³

V_a = volumen de agua almacenada en el embalse (m³)

ΔT = Salto térmico (diferencia entre la temperatura del agua de mina en el interior del embalse y su temperatura tras la extracción de calor (salida del intercambiador), antes de ser devuelta a la mina) (°C)

η_c = 0,0002778, factor de conversión (kWh/kJ)

Considerando una temperatura en el interior del embalse de 22°C y una caída de 5°C en la bomba de calor (salto térmico que optimiza el rendimiento energético), se obtiene una reserva de energía geotérmica de 33 GWh = $11,9 \cdot 10^{10}$ kJ solo para el embalse Barredo-Figaredo y 464 GWh para el conjunto de pozos de la CCC. Si se compara esta última cifra con las fuentes energéticas convencionales (considerando un poder calorífico de 11,7 kWh/m³ de gas y 7 kWh/kg de carbón; Menéndez *et al.*, 2019), *esta energía es equivalente a la de casi 40 millones de m³ de gas natural y 66.300 toneladas de carbón.*

Pero la potencia de una planta geotérmica no depende del volumen de agua almacenada sino del caudal de agua disponible, que en el caso de un embalse minero corresponde a su recarga por infiltración. El *potencial térmico del foco frío* de la bomba de calor es:

$$P_f = (\Delta T \cdot V_e \cdot C_e \cdot \rho) / t \quad [2]$$

Donde, además de los parámetros ya definidos en [1]:

V_e = volumen evacuado en un tiempo t

Para el caso del embalse Barredo-Figaredo y suponiendo un funcionamiento continuo del desagüe, para un año, $P_f = 2,65 \text{ MW}_{\text{térmicos}}$.

El cociente entre la cantidad de energía generada y la necesaria para la operación de la bomba de calor se conoce como COP (*Coefficient Of Performance*) y es una medida de su eficiencia. Para las condiciones de temperatura del agua disponible, las bombas de calor agua-agua habituales ofrecen valores de $\text{COP} \geq 5,4$, pudiendo producir agua caliente a 45°C (Jardón *et al.*, 2013).

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. En este ejemplo, $W_e \approx 0,6 \text{ MW}$, es decir que con un consumo de $0,6 \text{ MW}_{\text{eléctricos}}$ se generaría una potencia térmica de calefacción de $3,25 \text{ MW}_{\text{térmicos}}$, lo que supondría una energía térmica anual disponible para calefacción de $28,5 \text{ GWh}_{\text{térmicos}}$ al año, consumiendo únicamente $5,2 \text{ GWh}_{\text{eléctricos}}$. *El coste de generar esa misma energía térmica mediante caldera de gas, por ejemplo, sería muy superior al de la bomba de calor y además con el empleo de esta última se conseguiría un considerable ahorro en las emisiones de CO₂.*

Se podría realizar un cálculo análogo para evaluar el potencial térmico de las explotaciones de HUNOSA en su conjunto en la Cuenca Central. En este caso, la energía térmica anual disponible sería de $214 \text{ GWh}_{\text{térmicos}}$ al año, consumiendo menos de $40 \text{ GWh}_{\text{eléctricos}}$.

Para explotar el potencial del recurso geotérmico, la manera más razonable, rentable y eficiente, consiste en plantear el desarrollo de un *district heating* (red de calor) en el que a través de una red de distribución puedan adherirse los diferentes futuros clientes (sistemas centralizados que permiten conectar múltiples fuentes energéticas a múltiples puntos de consumo de energía). Suponen beneficios para los promotores inmobiliarios (economía de construcción, espacio útil, mejor calificación energética y mejora estética) y para los usuarios (ahorro de espacio, coste competitivo, menor inversión en mantenimiento, reducción de ruidos, etc.), además de beneficios ambientales y otras ventajas, como su integración en las denominadas *smart cities* (HUNOSA, 2019).

En esta línea, HUNOSA ha implementado un primer *district heating* en Mieres, a partir de agua de mina del pozo Barredo y un segundo en Langreo, a partir de agua del pozo Fondón. El primero comenzó con la climatización del edificio de investigación del Campus universitario de Mieres y al que se han ido sumando edificios próximos, como el

emblemático Hospital Vital Álvarez Buylla. Los proyectos de algunos edificios están en fase de explotación y otros en vías de implantación. Con una potencia cercana a los 6 MW_{térmicos} es el primer *district heating* geotérmico de España. Algunas inversiones ya se han amortizado y se han recibido importantes subvenciones de fondo europeos (información facilitada por HUNOSA).

Destacan las aplicaciones en edificios que, como el del Centro de Investigación o el Hospital en Mieres, presentan simultaneidad en la demanda de frío y calor. En este caso se utiliza un sistema de generación compensado de forma que cuando las necesidades de calor y frío del edificio se desequilibran, se emplea el agua de mina como fluido de compensación. Cuando las necesidades de frío superan a la demanda de calor (verano), el agua de mina actúa disminuyendo la temperatura del agua caliente de retorno a través de un intercambiador de calor y en invierno, cuando el edificio no es capaz de consumir todo el frío que requiere el sistema para funcionar compensado, el agua de mina se encarga 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 es necesaria calefacción y refrigeración simultánea, la misma máquina produce 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 convencional para garantizar la absoluta seguridad en el suministro.

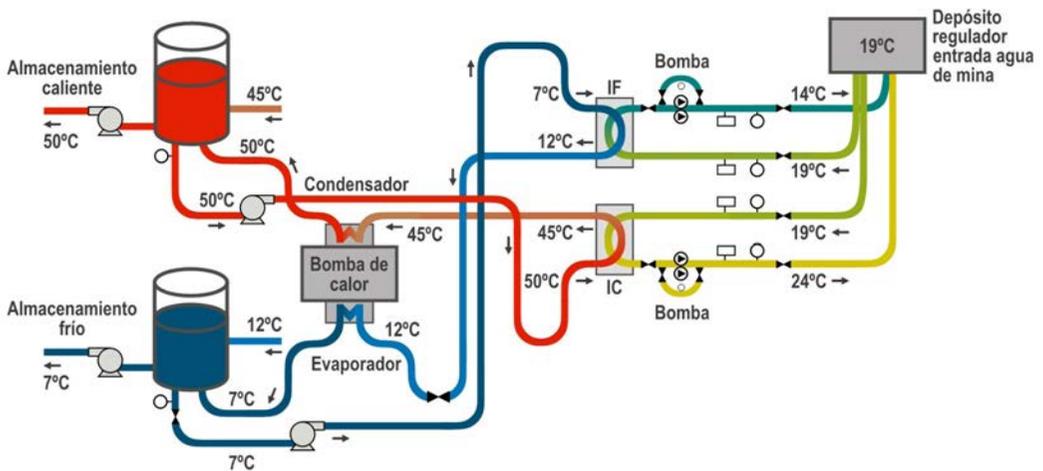


Figura 14. Esquema básico de bomba de calor con agua de mina y almacenamiento de frío y calor (Jardón, 2010)

Otro posible emplazamiento, pendiente de estudio, y con muchas posibilidades de aprovechamiento por su localización cerca de la ciudad más poblada de la región es *la mina de La Camocha* (Gijón). La temperatura del agua que inunda estas labores mineras, medida a algo más de 200 m de profundidad, es de unos atractivos 23°C. Al respecto de esta mina, hay una canción popular asturiana que dice:

*La mina de la Camocha
dicen que va baxo el mar
y que a veces los mineros
sienten les olas bramar (...).*

Pese a lo poético que resulta, esto no es técnicamente cierto, reservándose tal distinción (labores mineras por debajo del mar) en Asturias únicamente para la antigua mina carbón de Arnao (Castrillón) y, con las debidas reservas, para una parte ínfima de la mina de hierro de Llumeres (Gozón). En el caso de la primera, el pozo vertical, clausurado en 1915, está a 80 m de la línea de costa y las labores, con una profundidad de unos 120 m, avanzaron unos 500 m bajo el mar. El pozo de la mina de Llumeres, situado a unos 170 m de la línea de costa, llegó a unos 400 m de profundidad en su 7ª planta.

Resultaría interesante y está en estudio, aunque no se trate de agua de mina, el aprovechamiento geotérmico somero en las instalaciones de la Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo, aprovechando la hidrogeología local, para dar calefacción al edificio, de forma sensiblemente más económica, eficiente y sostenible que la actual, de forma que además los sondeos sirvieran para la realización de prácticas de alumnos.

4.3.1. Modelización

Resulta de gran interés realizar una modelización térmica del embalse minero para poder simular su explotación geotérmica a largo plazo (Loredo *et al.*, 2016). Pongamos como ejemplo los modelos desarrollados para el embalse Barredo-Figaredo.

En primer lugar, ha sido necesario realizar una modelización hidrológica del río Turón para saber si la recarga desde este al embalse se mantiene en el tiempo y la influencia de la temperatura de dicha recarga. Con el fin de conocer detalladamente las pérdidas de caudal del río hacia los huecos mineros y minimizar la incertidumbre de este parámetro durante la realización del modelo numérico, se modelizaron sus hidrogramas, en función de las características de la cuenca. Al comparar los hidrogramas modelados con los reales (tras dos años de registro diario del caudal del río en varios puntos del cauce) se pudieron definir los parámetros óptimos para un buen ajuste entre el caudal teórico y el real durante el periodo de modelización. Posteriormente, se aplicó el modelo obtenido a un periodo de precipitación de 30 años y se obtuvieron los hidrogramas simulados y los caudales medios para dicho periodo, así como el caudal infiltrado hacia el sistema minero en la zona más minada de la cuenca. Este valor estable puede ser usado sin incertidumbre como recarga en la definición del modelo matemático del embalse minero. Finalmente, se pudo comprobar (mediante el paquete informático *FEFLOW*, un modelo de elementos finitos que permite simular el flujo y el transporte de calor en el medio poroso) que un incremento del 20% de la recarga procedente del río reduce 1°C la temperatura del agua en el embalse (Ordóñez *et al.*, 2016).

En segundo lugar, se hizo necesario determinar la conductividad térmica de los materiales geológicos que conforman el embalse minero, ya que es un parámetro fundamental para el modelo térmico. Existen varios métodos para obtener ese parámetro. En este caso, se tomaron muestras representativas (en afloramiento) de cada una de las unidades litoestratigráficas y se estudiaron en lámina delgada mediante microscopía óptica de polarización, estimándose la proporción de los componentes de la roca matriz sólida en volumen. Conocida la composición y moda mineralógica de las rocas, es posible calcular su conductividad térmica a partir de la conductividad térmica de los minerales que constituyen la matriz rocosa (Horai, 1971), mediante el modelo de la media geométrica definido por Brigaud *et al.* (1990). La conductividad total de un medio poroso constituido por agregados de varios materiales depende de la conductividad térmica de la roca matriz, la porosidad y la conductividad térmica del fluido que la rellena, corregida con la temperatura. Con los datos obtenidos se calculó la conductividad térmica media de cada uno de los paquetes mineros. Los valores varían entre 1,42 y 4,89 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ para lutita y sublitarenita, respectivamente. Para determinar la influencia de la conductividad térmica

en la temperatura del agua del embalse se realizaron modelos numéricos con *FEFLOW*. Los mapas térmicos obtenidos tras 30 años de simulación usando los valores mínimo y máximo indicados muestran que cuanto menor es la conductividad térmica del macizo, menos se modifican las condiciones iniciales de temperatura tras la simulación. Al aumentar la conductividad térmica (mayor capacidad de transferencia de calor), el agua fría infiltrada ejerce una mayor influencia sobre las zonas cálidas (Andrés *et al.*, 2016). La Figura 15A muestra las conductividades térmicas determinadas para los materiales geológicos atravesados en la sección que une los pozos Barredo y Figaredo.

Finalmente se realizó un modelo térmico. Para ello se optó por dividir la zona de estudio en tres tipos de materiales con un rango de valores característicos de conductividad hidráulica, porosidad y almacenamiento específico: estructuras mineras, material alterado y material inalterado. La primera se corresponde con los huecos mineros residuales, que definen en mayor medida la capacidad del embalse y por las que fluirá preferentemente el agua, con velocidades relativamente altas. En contraste, la velocidad en las zonas de macizo inalterado será mucho más baja (Andrés, 2015). En una primera fase se realizó un modelo 2D vertical con el fin de poder calibrar las propiedades térmicas e hidrogeológicas del embalse minero. Se consideraron como entradas la infiltración procedente de la lluvia y del río. En la superficie (límite superior) se establece como condición de contorno una temperatura de entrada del agua variable en función de la temperatura ambiente diaria y en el borde inferior un flujo de calor geotérmico constante de $65 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (Renz *et al.*, 2009), trabajando con un gradiente térmico de $0,03 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$. Para definir hidrogeológicamente el modelo se realizó una calibración previa de los parámetros hidráulicos de los materiales representados, ajustando los niveles de inundación modelados con la conocida evolución temporal de la cota del nivel de agua durante el proceso de inundación del sistema. También se realizó un modelo 3D y ambos modelos se ensayaron en diferentes escenarios de explotación (por ejemplo, con y sin reinyección del agua utilizada al embalse), con resultados similares, pero por brevedad no se expondrán aquí los detalles. En síntesis, se observa que el agua de recarga fluye preferentemente por las galerías mineras enfriándolas, mientras que el macizo mantiene una temperatura más estable. Al cabo de 30 años de simulación, si el sistema se explotase como en la actualidad, la temperatura del agua se habría reducido entre 1 y 3°C , pero se observan temperaturas menores en el entorno del pozo Figaredo, lo que puede deberse a la infiltración procedente del río (Figura 15B). Se observa también que la falla de Barredo actúa como una zona de flujo preferente pero que no tiene una influencia significativa en la temperatura del sistema. Si el agua de mina, tras extraerle calor en el aprovechamiento geotérmico, se introduce de nuevo al embalse, la continua reinyección y bombeo hacen que se establezca una especie de bucle de forma que el agua más fría se mantiene principalmente en la parte superior del embalse, que está siendo contantemente renovada por los bombeos desde los pozos, mientras que en las zonas más profundas se observan temperaturas más altas (Andrés *et al.*, 2017).

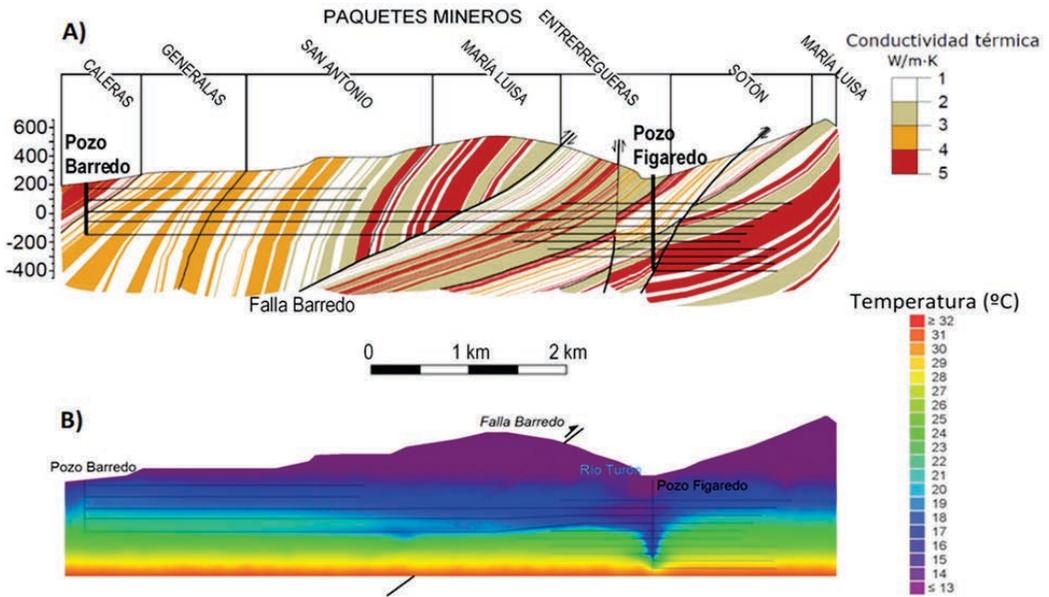


Figura 15. A) Corte transversal definido por los pozos Barredo y Figaredo mostrando las conductividades térmicas de las unidades geológicas (paquetes mineros) atravesadas por las labores; B) Temperatura en el embalse tras 30 años de simulación en un modelo 2D

4.3.2. Lecciones aprendidas

Son muchos los aspectos que se pueden estudiar a partir del funcionamiento de las instalaciones existentes, tras varios años en funcionamiento. Como condicionantes del aprovechamiento geotérmico del agua de mina, se pueden mencionar los siguientes: existen limitaciones debidas a las propias infraestructuras mineras y de desagüe, la distancia entre los puntos de producción y consumo es un factor limitante, debido al enfriamiento durante el transporte (con la distancia a los usuarios se reduce la eficiencia del sistema y aumenta el coste de inversión), son preferibles edificios singulares o bloques de viviendas, de mayor consumo, y a ser posible de nueva construcción por el coste que supone renovar las instalaciones previas, etc. (HUNOSA, 2019; Menéndez *et al.*, 2020).

En lo que se refiere a los costes energéticos, se deben considerar los correspondientes a: la extracción del agua del interior de la mina (aunque 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), la distribución del agua hacia los edificios, el bombeo en los circuitos de calefacción/refrigeración y el bombeo del agua de mina exhausta al punto de vertido al río. Comparados con sistemas convencionales estos sistemas pueden suponer un ahorro energético del 70% y una reducción de emisiones de CO₂ del 40% (Cordero *et al.*, 2010).

Por otra parte, el uso de agua de mina de elevada dureza y/o concentración en hierro, puede provocar problemas de formación de incrustaciones en tuberías de distribución y otras partes de los equipos. Por ejemplo, se observó que la instalación geotérmica del edificio de investigación de Mieres, en explotación desde 2010, requería un man-

tenimiento más intensivo del deseado, ya que experimentaba problemas de *clogging* en los elementos del sistema, derivados de la calidad del agua de mina empleada. El *clogging* (reducción de la sección de paso en los elementos de un sistema) y el *fouling* (acumulación de materiales indeseados sobre la superficie de un equipo) son típicos en los intercambiadores de calor y reducen su efectividad de dos formas: incrementando la resistencia a la transferencia de calor (dado que los materiales acumulados tienen una conductividad menor a la del intercambiador) y reduciendo la sección de paso del fluido, lo que causa una caída de presión que se traduce en costes extras de mantenimiento y pérdidas de producción (Loredo, 2017). La figura 16 muestra depósitos de hidróxidos amorfos de hierro precipitados sobre superficies de un filtro y las placas de un intercambiador de calor (en la actualidad se utilizan intercambiadores de tubos).

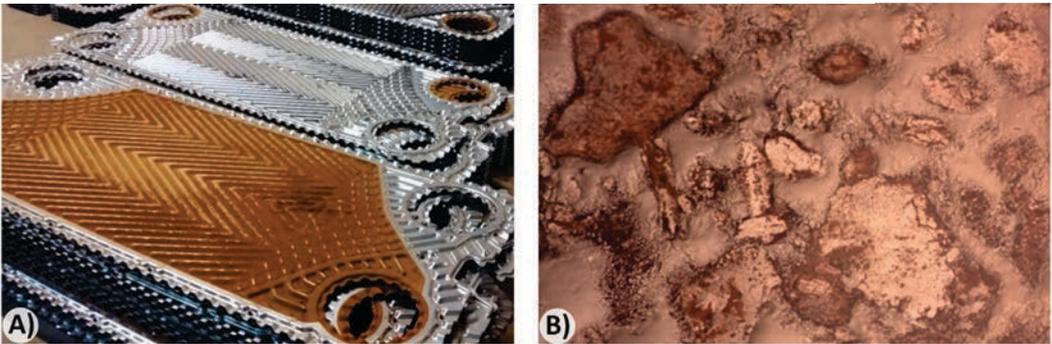


Figura 16. A) Depósitos en el intercambiador de calor; B) Imagen de microscopía óptica de reflexión de las partículas de compuestos de hierro que constituyen dichos depósitos (Loredo, 2017)

4.4. El agua de mina como recurso energético hidráulico

Aunque el aspecto más destacable del aprovechamiento energético del agua de mina es su uso como recurso geotérmico de baja entalpía, existe la posibilidad de devolver los caudales utilizados por las bombas de calor al embalse minero, lo que posibilita también su aprovechamiento microhidráulico para generar electricidad. La potencia de una central de este tipo viene dada por:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_n \cdot \eta_e \quad [3]$$

Donde:

P = potencia (W)

ρ = densidad del agua = 1000 kg/m³

g = aceleración de la gravedad = 9,81 m/s²

Q = caudal que fluye a través de la turbina (m³/s)

H_n = salto neto (m)

η_e = eficiencia de la turbina

Por ejemplo, considerando un salto neto de 70 m y un caudal medio retornado de 100 l/s, se tendría una potencia instantánea de 58 kW. Asumiendo que el agua se turbinada en horas punta y es bombeada en horas valle, se podría generar una energía de unos 300 MWh/año. El agua de retorno de algunos sistemas de bomba de calor al pozo minero, 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.

Este tipo de aprovechamiento microhidráulico (o incluso mediante picoturbinas) puede ser interesante en muchas aplicaciones en las que exista un salto (diferencia de cota), y no solo en el caso de agua de mina. En el apartado 4.1. se mencionaron las posibilidades de aprovechamiento hidráulico de las aguas residuales tratadas antes de ser vertidas a un cauce. Cabe mencionar también la posibilidad de instalar un aprovechamiento hidroeléctrico en el sistema de abastecimiento de agua a Oviedo. Este podría ser múltiple: 1) entre los manantiales del Aramo y la Estación potabilizadora (E.T.A.P.) de Cabornio, 2) entre dicha E.T.A.P. y los depósitos de abastecimiento a la ciudad, en ambos casos aprovechando el salto entre los mismos, mediante turbogeneradores de nueva generación; 3) entre el embalse de Los Alfilorios y la captación auxiliar del río Nalón en Palomar, mediante una central reversible que turbine en horas punta y bombee en horas valle con turbogeneradores análogos; 4) estos sistemas podrían combinarse con unos aerogeneradores que suministrasen la energía eólica necesaria para el funcionamiento en bombeo, haciendo el sistema totalmente sostenible. Este diseño permitiría incrementar el caudal extraído del río cuando fuese necesario. Estos sistemas podrían ejecutarse de forma independiente y son viables económicamente e interesantes desde el punto de vista financiero, obteniéndose valores de Tasas Internas de Retorno (TIR) entre 6 y 20% y periodos de amortización entre 5 y 12 años, con inversiones reducidas. Se trata de un recurso actualmente no utilizado y que podría emplearse para venta o autoconsumo, y su aprovechamiento debería potenciarse, máxime en un país energéticamente dependiente y en una región como la nuestra. Estos sistemas son extrapolables a otras ciudades y van en la línea del concepto de «ciudad sostenible». El desarrollo de este proyecto fue presentado al concurso EDPR University Challenge en su edición de 2018 por tres alumnos de la Escuela de Ingeniería, Energía y Materiales, obteniendo un meritorio tercer puesto.

4.5. Sistemas de almacenamiento de energía. La mina como una batería gigante

Las energías renovables están experimentando un desarrollo creciente, tanto por el propósito de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (ya comentado), como por una importante evolución de las tecnologías de generación renovable, principalmente eólica y solar, lo que ha permitido reducir sus costes de generación. Tanto es así que, en la actualidad, más de dos tercios de la población mundial vive en países donde la energía solar o eólica, si no ambas, son las fuentes más económicas de generación de electricidad (FCH JU, 2015). Así, se espera que gran parte del crecimiento de la potencia instalada mundial esté ligada al auge de las renovables, que se convertirán en la principal fuente del mix energético, primero en Europa y luego en el resto del mundo. Sin embargo, esto no será posible a menos que haya una profunda transformación del sistema eléctrico. En particular, las instalaciones de almacenamiento de energía pueden garantizar una continuidad de suministro que las energías renovables no pueden proporcionar, dada su naturaleza intermitente (en función del sol o el viento), convirtiéndose en una solución para la estabilidad de la red en la integración de fuentes de energía renovables no gestionables (Matos *et al.*, 2019).

Dentro de las instalaciones de almacenamiento de energía, cabe destacar los sistemas UPHEs (*Underground Pumped Hydroelectric Energy Storage*) en minas subterráneas. Se

trata de reconvertir las minas en desuso en centrales de bombeo de agua para el almacenamiento del excedente de energía solar y eólica. El concepto de central reversible de bombeo es bien conocido (existe, por ejemplo, entre los embalses de Tanes y Rioseco en Asturias), pero la diferencia es que en este caso, uno de los dos depósitos (o ambos) son subterráneos. Aunque la tecnología no es nueva (principios del s. XX), está siendo desarrollada en los últimos años, ya que estos sistemas tienen un gran potencial futuro. El almacenamiento se produce en forma de energía potencial del agua, pues la planta se establece entre un embalse superior (superficie) y otro inferior (subterráneo, dentro de la mina). En horas valle, cuando el precio de la energía es bajo porque no hay mucha demanda, se bombea el agua del depósito inferior al superior, tomando energía de la red, mientras que en horas punta, de alta demanda, el agua se turbin, regresando al embalse inferior y generando electricidad que se vierte a la red a un precio competitivo. El beneficio de estos sistemas radica en las diferencias tarifarias y entre sus características más destacadas se incluyen un tiempo de arranque corto, también conocido como *fast-ramping* y una elevada eficiencia.

Como ventajas de utilizar las minas clausuradas se pueden citar las siguientes: no son necesarias diferencias topográficas ni la construcción de grandes depósitos superficiales; el depósito inferior no es visible y puede estar en la misma vertical que el superior, lo que reduce la longitud de conductos, con un salto mayor; el depósito subterráneo ya está disponible, al igual que los pozos de acceso y otras infraestructuras (bombas, tuberías, etc.) y tanto el llenado inicial como las reposiciones por evaporación del depósito exterior se llevarían a cabo con el bombeo del agua subterránea de la mina, por lo que no habría que desviar un río para su llenado, evitando impactos medioambientales. La energía almacenable en estos sistemas depende de la capacidad del embalse y del salto hidráulico. Se prefieren minas de reservas agotadas, cuya estructura sea bien conocida y que ofrezcan estabilidad geomecánica. También se aconseja perforar una nueva red de túneles para constituir el embalse de agua, en lugar de usar los antiguos huecos mineros, por su menor estabilidad, aunque ello tiene un mayor coste. Los parámetros de diseño más decisivos para el rendimiento de una planta UPHES son el salto neto de la instalación y la capacidad del depósito inferior, aunque los aspectos hidrogeológicos tienen un papel vital en su viabilidad técnica y rendimiento económico (Menéndez *et al.*, 2019).

La inversión de estos sistemas es muy alta: 1300 - 2000 €/kW y casi no hay aplicaciones a escala real. No obstante, se puede citar la mina Prosper-Haniel (Alemania), que produjo carbón durante más de 50 años y ahora se pretende usar para generar energía hidroeléctrica mediante una planta UPHES de 200 MW y un coste de 500 millones de euros, que se espera entre en actividad en 2025 y genere electricidad para unos 400.000 hogares con un impacto ambiental mínimo. El almacén inferior tiene una capacidad de 5,7 hm³, el caudal de bombeo es de 40 m³/s y el salto de 530 m. Se promueven iniciativas similares en USA, Australia, China, Sudáfrica, Reino Unido y algunos otros países europeos (Niemann, 2018).

En el contexto de Asturias, un UPHES proyectado en el pozo Lieres (Siero) –uno de los más profundos de la región- diseñado para aprovechar sus huecos mineros, considerando un salto neto de 519,5 m y una potencia instalada de 39,8 MW, permitiría obtener una rentabilidad positiva de 38,5 millones de euros, llegando a alcanzar unos beneficios del orden de 73,7 millones de euros si se considera la obtención de una subvención del 50%. Sin embargo, el escenario en el que se plantea la construcción de un nuevo depósito inferior, no presenta resultados económicamente favorables, debido a los altos costes de excavación de los túneles (Domínguez, 2020).

Otro tipo de tecnología en esta línea son las plantas de almacenamiento de energía mediante aire comprimido (*Compressed Air Energy Storage*, CAES), que también pueden

ejecutarse utilizando huecos mineros. En horas valle, mediante compresores se incrementa la presión del aire y este se almacena en la mina; cuando aumenta la demanda, el aire se expande y acciona una turbina para generar electricidad. La temperatura del gas aumenta al comprimirse y desciende al expandirse, por lo que para mejorar la eficiencia, se enfría en el proceso de compresión y se precalienta antes de la turbina. Las minas deben encajar en formaciones geológicas estables (por ejemplo de sal) que resistan los ciclos de presión repetidos y los huecos mineros deben ser sellados para evitar fugas. Esta tecnología es menos madura que la anterior (tiene unos 40 años) y presenta unos costes también elevados (1000 €/kW). La vida útil de una planta CAES es inferior a la de una planta UPHES y también lo es su potencia. Hay muy pocas plantas en operación.

Existe la opción de combinar la tecnología UPHES con otros tipos de sistemas de almacenamiento y generación de energía (CAES, geotermia). En el caso particular de aplicación de estos tres sistemas en un único pozo como el de Lieres (con la disposición de la Figura 17, se estima que se podría obtener una generación de energía eléctrica de 153 y 197 GWh/año mediante los sistemas UPHES y CAES, respectivamente y una generación de energía térmica de 0,41 GWh/año mediante el sistema geotérmico, con un coste total de 358 M€ (Menéndez *et al.*, 2019).

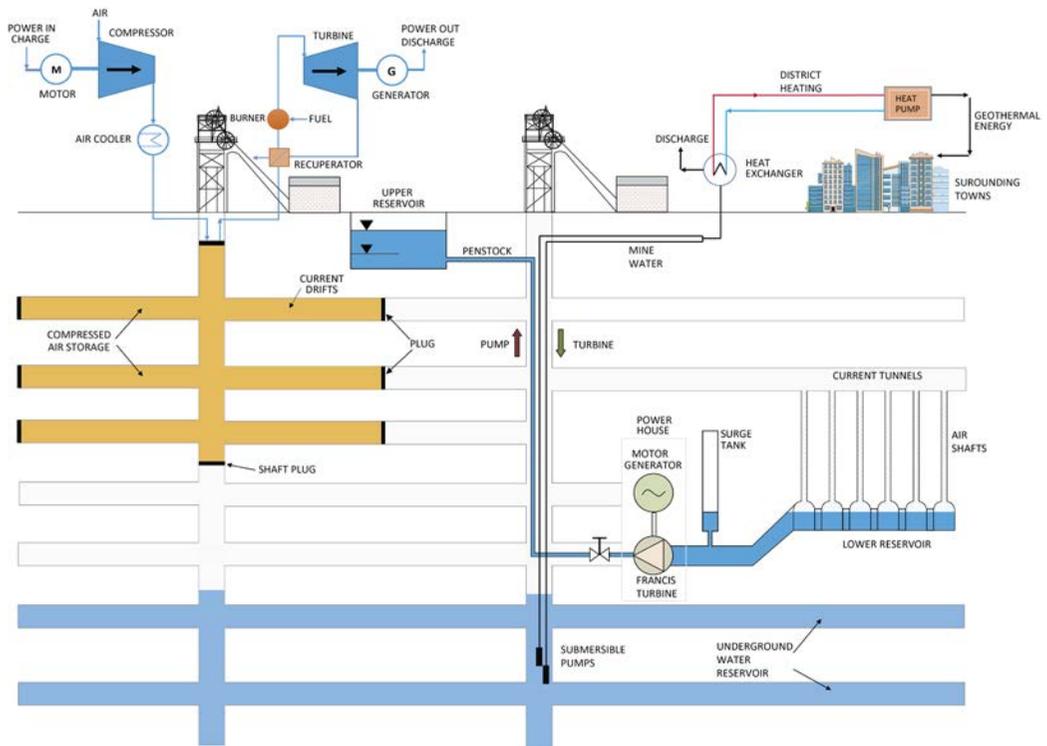


Figura 17. Sistema combinado de UPHES, CAES y planta geotérmica en una mina de carbón (Menéndez *et al.*, 2019)

También es posible realizar sistemas híbridos de generación-almacenamiento completamente renovables, en caso de disponer de un recurso eólico o solar competitivo. Dado que la legislación actual permite el autoconsumo con la posibilidad de vertido a red, no solo se podría almacenar la energía generada a partir de las fuentes renovables, sino que también se podría aprovechar para alimentar la bomba de la central hidroeléctrica, o

en otro caso, verter directamente a la red a precio de mercado diario. En esta línea, dos alumnos de la Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales resultaron ganadores en la convocatoria internacional del concurso EDPR University Challenge en su edición de 2020, con el proyecto titulado «Generación sostenible y almacenamiento subterráneo de energía en el marco de la descarbonización del sector eléctrico». En este trabajo, se combina un sistema UPHES en una mina de carbón cerrada en Asturias con una instalación de generación de energía eólica de aerogeneradores de eje vertical y se evalúa la eficiencia del sistema híbrido. Con un coste de inversión de 193 millones de euros, una planta UPHES de 40 MW conectada a un parque eólico de 60 MW generaría unos beneficios de unos 54 millones de euros en 40 años, con una reducción de las emisiones de 29.000 toneladas de CO₂ equivalentes al año, además de otras ventajas intangibles de este sistema (Álvarez *et al.*, 2021).

La puesta en marcha de estos sistemas aprovechando infraestructuras mineras permitiría reducir las emisiones de CO₂ y capacitar al sistema eléctrico para una mayor integración de fuentes renovables en el mix. Además, supondría un incentivo respecto a los problemas derivados de la clausura de minas, tanto en lo referente a costes remanentes como a la reconstrucción del tejido sociolaboral de las zonas mineras (Domínguez, 2020).

4.6. Otros aprovechamientos

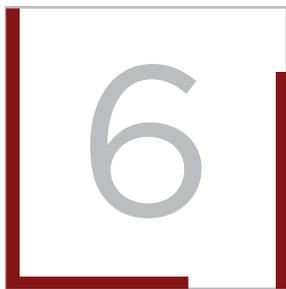
También existen ejemplos de economía circular aplicada al agua de mina mineralizada. Un elevado caudal (50.000 m³/día) de agua ácida y altos contenidos en sulfatos, Fe, Mn, Al, etc., procedente de minería de carbón en eMalahleni (Sudáfrica), recibe un tratamiento activo (ósmosis inversa) que le confiere calidad de agua potable, para ser distribuida a la red de suministro comunitario. En el tratamiento se generan como residuos: salmuera (100 m³/día) y lodo yesífero (200 t/día). La salmuera se almacena y concentra en balsas de evaporación y se estudia –entre otras opciones– la capacidad de ciertas algas que se desarrollan en ella, reduciendo su volumen hasta un 90% y produciendo sustancias valiosas como betacaroteno y glicerol. El lodo se transforma en subproductos como azufre, cal y carbonatos magnésico y cálcico; este último se emplea en la fase de neutralización del tratamiento del agua. Otra opción es usar el lodo directamente para fabricar materiales de construcción: placas de yeso, puertas resistentes al fuego, etc. y se han construido casas a bajo coste para los empleados de la mina. El coste del tratamiento asciende a 1,5 dólares/m³ pero el municipio paga 1 dólar por m³ de agua tratada (Hutton *et al.*, 2009). En esta misma línea, el contenido metálico de algunas aguas de mina hace pensar en las posibilidades de su recuperación, como podría ser obtener el cobre mediante métodos electroquímicos. Los oxi-hidróxidos de Fe se pueden transformar térmicamente en hematites, que se puede usar como adsorbente y como base para pigmentos y también se puede obtener ácido sulfúrico de las aguas ácidas para uso industrial. También, algunas aguas ferruginosas (ricas en hierro) han sido mezcladas con aguas residuales para mejorar el tratamiento de estas al aprovecharse de la capacidad floculante del hierro al formar precipitados de hidróxido férrico. Esto podría aplicarse a las aguas de mina de la Faja pirítica (Huelva), cuya acidez y contenido metálico es considerable. Son tantas las posibilidades de aprovechamiento del agua de mina que, como señalan Watzlaf y Ackman (2006): «*A minewater is a terrible thing to waste!*»

Otros usos posibles serían los de tipo recreativo. Por ejemplo, en 2018 abre un hotel de lujo en una antigua explotación a cielo abierto inundada en Shanghái (China). Parte del edificio está sumergido y se mantiene un bombeo constante. Los huéspedes disfrutan de la vista de una cascada de agua y pueden hacer actividades en el agua o incluso escalar el hueco de la explotación.

5

Conclusión

Resulta indudable la riqueza de Asturias en recursos minerales; algunos se explotan o se han explotado y otros están en fase de prospección. En particular, los recursos hidrogeológicos de nuestra región son excelentes, pero están infrautilizados y no lo bastante estudiados. Por otra parte, las labores mineras cerradas e inundadas configuran un extraordinario «embalse subterráneo» susceptible de ser aprovechado como recurso, tanto hídrico (asegurando su calidad) como energético (geotérmico o hidráulico). El actual aprovechamiento geotérmico del agua de mina (tradicionalmente considerada como un pasivo) en algunas minas de la Cuenca Central asturiana en forma de redes de calor es único en Europa y se prevé una extensión análoga a otros pozos mineros. La caracterización hidrogeológica previa del embalse minero, su modelización para predecir el comportamiento a largo plazo en condiciones de explotación, así como la monitorización posterior resultan fundamentales para la ejecución eficaz de estos sistemas. Existen posibilidades de aprovechamiento del agua y los huecos de las minas, como son los sistemas de almacenamiento de energía (UPHES, CAES) que constituyen alternativas sostenibles, eficientes y flexibles para hacer frente a la naturaleza intermitente de las fuentes de energía renovable. La implementación de estos sistemas, que utilizan un residuo (agua de mina) como recurso, pueden ayudar en la reconversión económica de antiguas regiones mineras y desde luego se enmarcan dentro de la denominada economía circular.



Bibliografía

- Adaro, L., 1967. *Bosquejo geológico de la minería asturiana*. I Feria Internacional de maquinaria de minas, yacimientos y canteras (Gijón), 53 p.
- Álvarez, H., Domínguez, G., Ordóñez, A., Menéndez, J., Álvarez, R., Loredó, J., 2021. *Mine Water for the Generation and Storage of Renewable Energy: A Hybrid Hydro-Wind System*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18, 6758.
- Álvarez, R., Ordóñez, A., De Miguel, E., Loredó, C., 2016. *Prediction of the flooding of a mining reservoir in NW Spain*. Journal of Environmental Management, 184: 219-228.
- Álvarez, R., Ordóñez, A., García, R., Loredó, C., 2018. *An estimation of water resources in flooded, connected underground mines*. Engineering Geology, 232: 114-122.
- Álvarez, R.A., 2017. *Contribución al estudio hidrogeológico de los manantiales de Obona (Tineo, Asturias). Caso de la Fuente del Matexo*. Trabajo Fin de Grado. Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo. Universidad de Oviedo, 118 pp.
- Andrés, C., 2015. *Modelización hidrogeológica y térmica de un embalse minero subterráneo. Aplicación a un caso en la Cuenca Central Asturiana*. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo, 157 p.
- Andrés, C., Álvarez, R., Ordóñez, A., 2016. *Estimation of thermal conductivity of rocks from their mineralogical composition (Asturian Coal Basin, NW Spain) for modeling purposes*. Environmental Earth Sciences, 75: 266-275.
- Andrés, C., Ordóñez, A., Álvarez, R., 2017. *Hydraulic and Thermal Modelling of an Underground Mining Reservoir*. Mine Water and the Environment, 36: 24-33.
- Arquer, F., Meléndez M., Nuño C., Rodríguez M.L., 2006. *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». Universidad de Oviedo.

- Bao, T., Meldrum, J., Green, C., Vitton, S., Liu, Z., Bird, K., 2019. *Geothermal energy recovery from deep flooded copper mines for heating*. Energy Conversion and Management, 183: 604-616.
- Bello, X., 1997. *Fantasmas de Obona*. Clarín: Revista de nueva literatura, nº 9, p. 32- 34.
- Bentabol, H., 1897. Las aguas de España y Portugal. Impresor de Cámara de S. M. Madrid.
- BloombergNEF, 2022. *New Energy Outlook 2021*. <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/#download>
- Brigaud, F., Chapman, D.S., Le Douoran, 1990. *Estimating Thermal Conductivity in Sedimentary Basins Using Lithologic Data and Geophysical Well Logs*. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 74(9): 1459-1477.
- Bruni, L., 2021. *El agua y la Biblia*. SOUQuaderni. <https://www.luiginobruni.it/es/ec-bv/el-agua-y-la-biblia.html>
- Burke, S.P., Younger, P.L., 2000. *Groundwater Rebound in the South Yorkshire coalfield: A First Approximation using the GRAM model*. Quarterly Journal of Engineering Geology, 33: 149-160.
- Carrera, J., 2018. *Recarga artificial: ¡es urgente empezar!*. Agua y Medio Ambiente, 55: 12-13.
- CHC (Confederación Hidrográfica del Cantábrico), 2015. *Memoria del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental (2015-2021)*. 412 p. https://www.chcantabrico.es/documents/20143/57474/1_MEMORIA.pdf/d6dedc5f-0b14-9fe7-c44e-08f3c55a4b20
- CHC (Confederación Hidrográfica del Cantábrico), 2021. *Propuesta de proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental (revisión para el tercer ciclo 2022-2027) - Memoria*. Texto Consulta Pública, 193 p. <https://www.chcantabrico.es/documents/20143/789120/memoria.pdf/ce-4fa883-459a-0029-ccaf-f1eaddbefb8e>
- Comisión Europea, 2020a. *Resiliencia de las materias primas fundamentales: trazando el camino hacia un mayor grado de seguridad y sostenibilidad*. Comunicación COM (2020) 474 final. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42849>.
- Comisión Europea, 2020b. *Un nuevo modelo de industria para Europa*. Comunicación COM (2020) 201 final. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. <https://eur-lex.europa.eu>.
- Convenio HUNOSA-IGME-UNIOVI, 2008. *Estudio sobre la Inundación de los Pozos Mineros en la Zona Barredo - Valle del Turón - Valle del Aller*. Convenio de Colaboración entre HUNOSA, Universidad de Oviedo e IGME. Informe inédito.
- Cordero, C., Garzón, M.B., Álvarez, C.J., 2010. *Aprovechamiento geotérmico de las aguas de mina*. Universidad de Oviedo: Campus geotérmico. Libro de actas del Congreso GEOENER 2010.
- De la Fuente, M., 2011. *Sobre el Padre Feijoo y el Monasterio de Obona*. El Catoblepas: Revista crítica del presente, nº 115, p 11.
- 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.
- Delgado, A., Regalado, M.C., 2012. *Rotae Urionensis. Las norias romanas de Riotinto (Huelva, España)*. http://www.traianvs.net/pdfs/2011_riotinto-02.pdf
- Domínguez, G., 2020. *Almacenamiento energético en explotaciones mineras cerradas de carbón. Aplicación a la mina de Lieres (Asturias)*. Trabajo fin de grado. Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo. Universidad de Oviedo, 131 p.
- El Comercio, 2015. *El derribo en la sombra de Los Pilares*. 25 de enero de 2015.

- FCH JU (Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking), 2015. *Commercialisation of energy storage in Europe*. Final report. https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/CommercializationofEnergyStorageFinal_3.pdf
- Fernández, J.R., Alonso, J.A., Loredó, J.L., 2008. *La inundación de la mina de Reocín*. En: Investigación y Gestión de los recursos del subsuelo. Libro-homenaje al Profesor Fernando Pendás, p 389-404. IGME, Serie Hidrogeología y aguas subterráneas nº27. Madrid.
- Fernández-Rubio, R., 2002. *Clausura de minas: Impactos hidrogeológicos*. En: El agua en el cierre de minas, Pendás, F. y Loredó, J. (Eds.). Universidad de Oviedo. Oviedo, 288 p.
- Fernández-Rubio, R., Fernández, S., Esteban, J., 1986. *Abandono de Minas. Impacto Hidrológico*. ITGE, Madrid, 267 p.
- Fundación Humana, 2017. *Avanzando hacia la economía circular*. Dossier de la jornada técnica: Gestión sostenible de los residuos. Universidad de Oviedo.
- García-Fuente, P.A., 1996. *Sistema experto de predicción de desagües en minas subterráneas de carbón. Aplicación al Grupo Aller de HUNOSA*. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo.
- García-Marín, R., Lozano-Parra, J., Espejo-Marín, C., Aparicio-Guerrero, A.E., 2020. *The Production and Marketing of Mineral Water in 21st Century Spain*. Water, 12, 2311. <https://doi.org/10.3390/w12082311>
- González, J., Rebollar, A., 1986. *Interrelaciones de la minería y las aguas subterráneas en el Carbonífero de la Cuenca del Nalón (Sector Pola de Laviana-Olloniego)*. Informe técnico. IGME.
- González-Nistal, S., Álvarez, R., Ruiz, F., 2020. *Contribución al conocimiento de la geología económica en la cuenca del río Esva*. En: Ordóñez, A. y Álvarez, R. (Eds.): Recursos minerales y medioambiente: una herencia que gestionar y un futuro que construir: Libro Jubilar del profesor Jorge Loredó, p. 193-204.
- Gutiérrez-Claverol, M., Luque, C. (Eds.), 2010. *Riquezas geológicas de Asturias*. Oviedo, 416 p.
- Gutiérrez-Claverol, M., Luque, C., 1994. *Recursos del subsuelo de Asturias*. 2ª edición. Servicio de publicaciones de la Universidad de Oviedo, Oviedo, 392 p.
- Hall, A., Scott, J.A., Shang, H., 2011. *Geothermal energy recovery from underground mines*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15: 916-24.
- Hedin, R.S., Nairn, R.W., Kleinmann, R.L.P., 1994. *Passive Treatment of Coal Mine Drainage*. U.S. Bureau of Mines IC 9389, 35 p.
- Hevia, T., 1973. *Las aguas subterráneas*. Instituto de Estudios Asturianos. Oviedo, 59 p.
- Horai, K. 1971. *Thermal conductivity of rock-forming minerals*. Journal of Geophysical Research, 76 (5): 1278-1308.
- HUNOSA, 2019. *Geotermia y biomasa*. Jornada técnica: «Hacia modelos energéticos sostenibles». Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo.
- Hutton, B., Kahan, I., Naidu, T., Gunther, P., 2009. Operating and maintenance experience at the Emalaheni water reclamation plant. Actas de la International Mine Water Conference. Sudáfrica, 415-430.
- IEA (International Energy Agency), 2022. *World Energy Outlook 2021*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- IGME (Instituto Geológico y Minero de España), 1982. *Programa nacional de investigación de aguas subterráneas*. Estudio hidrogeológico de la cuenca norte de España (Asturias). Informe técnico inédito, 194 p.
- IGME (Instituto Geológico y Minero de España), 1990. *Estudio hidrogeológico sobre la incidencia del vertido de aguas residuales al río Piles en el acuífero de Deva (Gijón)*. Informe técnico, 48 p.
- IGME (Instituto Geológico y Minero de España), 2000. *Panorama actual de las aguas minerales y minero-medicinales en España*. IGME, Madrid, 407 p.

- IGME (Instituto Geológico y Minero de España), 2001. *Las aguas subterráneas; un recurso natural del subsuelo*. IGME, Fundación Botín, Madrid, 94 p.
- IGME (Instituto Geológico y Minero de España), 2002. *Estudio del potencial de aguas minerales y termales del Principado de Asturias*. Informe técnico, 1406 p.
- IGME (Instituto Geológico y Minero de España), 2013. *100 años de Hidrogeología en España*. Serie Hidrogeología y aguas subterráneas. Fornés, J.M., López-Geta, J.A. (Eds.). Madrid, 814 p.
- IGME (Instituto Geológico y Minero de España), 2015. Base de Datos de Metalogenia (Yacimientos e Indicios Minerales) (BDMIN_Indicios). https://mapas.igme.es/gis/services/BasesDatos/IGME_BDMIN_Indicios/MapServer/WMS/Server
- IGME (Instituto Geológico y Minero de España), 2022. *Mapa Hidrogeológico de España a escala 1:1.000.000*. https://mapas.igme.es/gis/services/Cartografia_Tematica/IGME_Hidrogeologico_1M/MapServer/WMS/Server
- IGME, 1984. *Investigación Hidrogeológica de la Cuenca Norte: Asturias. Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas*. Ministerio de Industria y Energía, Secretaría de la Energía y Recursos Minerales. Madrid.
- INE (Instituto Nacional de Estadística), 2020. *Estadística sobre el Suministro y Saneamiento del Agua (Año 2018)*. https://www.ine.es/prensa/essa_2018.pdf
- Jardón, S., 2010. *Aprovechamiento de las aguas de mina en la Cuenca Central Asturiana como recurso energético. Aplicación al embalse minero Barredo-Figaredo*. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo.
- Jardón, S., Ordóñez, A., Álvarez, R., Cienfuegos, P., Loredó, J., 2013. *Mine water for energy and water supply in the Central Coal Basin of Asturias (Spain)*. *Mine Water and the Environment*, 32: 139-151.
- Jiménez, T., 2019. *La Directiva Marco del Agua, una revisión polémica*. *Agua y Medio Ambiente*, 61: 8-11.
- Jiménez-Cisneros, B.E., Oki, T., Arnell, N.W., Benito, G., Cogley, J.G., Döll, P., Jiang, T., Mwakalila, S.S., 2014. *Freshwater resources*. En: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, p. 229-269.
- Juncosa, R., Delgado, J., Padilla, F., Rodríguez, P., Hernández, H., 2016. *Improvements in Mero River basin water supply regulation through integration of a mining pit lake as a water supply source*. *Mine Water and the Environment*, 33: 389-397.
- Kleinmann, R.L.P., 1985. *Treatment of Acidic Mine Water by Wetlands*. U.S. Bureau of Mines IC 9027. Vol. 1, 48-52.
- Kortas, L., Younger, P.L., 2007. *Using the GRAM Model to Reconstruct the Important Factors in Historic Groundwater Rebound in Part of the Durham Coalfield, UK*. *Mine Water and the Environment*, 26: 60-69.
- La Región, 2017. *Galicia concentra el 10% de las aguas minerales de España y el 8% del empleo*. 15 de enero de 2017.
- León, R., 1912. *La Escuela de los Sofistas*. Renacimiento, Madrid, 325 p.
- Linares, L., 2013. *Agua y Románico. Manantiales y fuentes en el románico español*. Académica Malagueña de Ciencias. Málaga, 96 pp.
- Llopis, N., 1957. *Datos sobre las aguas subterráneas de los alrededores de Oviedo*. *Breviario Geológica Astúrica*, 1(1-2): 27-31.
- LNE (La Nueva España), 2012. *Agua para el progreso*. 2 de diciembre de 2012.
- LNE (La Nueva España), 2022a. *Cuatro "autopistas del agua" garantizarán que ningún punto de Asturias quede desabastecido*. 29 de enero de 2022.
- LNE (La Nueva España), 2022b. *Gijón y Arcelor «beben» casi la mitad del agua que Cadasa suministra a los concejos y las industrias*. 27 de junio de 2022.
- Loredó, C., 2017. *Evaluación del potencial energético y optimización de sistemas geotérmicos de muy baja entalpía asociados a agua de mina*. Tesis doctoral. Universidad de Oviedo.

- Loredo, C., Ordóñez, A., Garcia-Ordiales, E., Álvarez, R., Roqueñi, N., Cienfuegos, P., Peña, A., Burnside, N.M., 2017. *Hydrochemical characterization of a mine water geothermal energy resource in NW Spain*. Science of the Total Environment, 576: 59-69.
- Loredo, C., Roqueñi, N., Ordóñez, A., 2016. *Modelling flow and heat transfer in flooded mines for geothermal energy use: A review*. International Journal of Coal Geology, 164 (1): 115-122.
- Loredo, J., Ordóñez A., Pendás, F., 2000. *El hueco minero como acuífero. Depuración de aguas de mina mediante sistemas pasivos*. Libro de actas del congreso Jornadas Hispano-Lusas sobre la Aguas Subterráneas en el Noroeste de la Península Ibérica. Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo español. J. Samper, T. Leitao, L. Fernández, L. Ribeiro (Eds.). Vol.1, p. 455-466.
- Loredo, J., Ordóñez, A., Álvarez, R., 2013. *Estudio hidrogeológico del entorno de los pozos Fondón y Candín I y II de cara a su inundación controlada*. Dpto. Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo. Informe técnico.
- Loredo, J., Pendás, F., Álvarez, R., Cienfuegos, P., García, R., Marqués, A., Ordóñez, A., Otal, M.A., 2010. *Recursos hídricos en Asturias: análisis, reflexiones y alternativas*. Fundación Infide, Castillejo, P. (coord.), Oviedo, 221 p.
- Martínez-Gil, F.J., 1972. *Aspecto histórico y evolutivo de las ideas acerca de las aguas subterráneas desde los tiempos más remotos hasta el nacimiento de la Ciencia Hidrogeológica*. Memoria para la plaza de Profesor Agregado en la Universidad de Salamanca. Documento inédito, 10 p. <https://hidrologia.usal.es/Complementos/historia.pdf>
- Martínez-Santos, P., 2018. *Hidrogeología; principios y aplicaciones*. Mc Graw Hill, Madrid, 348 p.
- Martos, E., 2014. *Caracterización hidrogeológica de la cuenca del río Turón (Asturias) en relación con la clausura de explotaciones mineras de carbón*. Tesis doctoral. Universidad de Oviedo.
- Matos, C.R., Carneiro, J.F., Silva, P.P., 2019. *Overview of large-scale underground energy storage technologies for integration of renewable energies and criteria for reservoir identification*. Journal of Energy Storage, 21: 241-258.
- Melgarejo, J., 2017. *La reutilización del agua en el marco de la economía circular*. Agua y Medio Ambiente, 44: 22-23.
- Menéndez, J., Ordóñez, A., Álvarez, R., Loredo, J., 2019. *Energy from closed mines: Underground energy storage and geothermal applications*. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 108: 498-512.
- Menéndez, J., Ordóñez, A., Fernández-Oro, J.M., Loredo, J., Díaz-Aguado, M.B., 2020. *Feasibility analysis of using mine water from abandoned coal mines in Spain for heating and cooling of buildings*. Renewable Energy, 144: 1166-1176.
- Minería sostenible de Galicia, 2019. *Los secretos que guarda el fondo del lago de Meirama*. <https://minariasostible.gal/es/los-secretos-que-guarda-el-fondo-del-lago-de-meirama/>
- Minería sostenible de Galicia, 2022. *La minería sostenible que ha transformado As Pontes*. <https://minariasostible.gal/es/mineria-sostenible-lago-as-pontes/>
- MITECO (Ministerio para la transición justa y el reto demográfico), 2020. *Hoja de ruta para la gestión sostenible de las materias primas minerales*. Disponible en <https://energia.gob.es>.
- MITECO (Ministerio para la transición justa y el reto demográfico), 2022a. *Catastro Minero*. <https://geoportal.minetur.gob.es/CatastroMinero/Descargas>
- MITECO (Ministerio para la transición justa y el reto demográfico), 2022b. *Estrategia Española de Economía Circular y Planes de Acción*. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/estrategia/>
- Niemann, A., 2018. *Underground pumped hydroelectric storage using existing coal mining infrastructure of Prosper Haniel Mine, Germany*. 4th Meeting Coal Regions in Transition - Energy Storage.

- Nuttal, C.A., Younger, P.L., 2004. *Hydrochemical stratification in flooded underground mines: an overlooked pitfall*. Journal of Contaminant Hydrology, 69: 101-114.
- ONU, 2022. *UN World Water Development Report 2022*. <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2022/>
- Ordóñez, A., Álvarez, R., 2021. *Estudio hidrogeológico de la mineralización de Salave y áreas adyacentes*. Dpto. Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo. Informe técnico, 120 p.
- Ordóñez, A., Álvarez, R., García, C., 2022. *Estudio hidrogeológico del Área Carrio: Consideraciones sobre su inundación controlada*. Dpto. Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo. Informe técnico, 80 p.
- Ordóñez, A., Andrés, C., Álvarez, R., 2016. *Forecasting of hydrographs to simulate long term recharge from rivers in numerical models of mining reservoirs; Application to a coal mine in NW Spain*. River Research and Applications, 32(4): 552-560.
- Ordóñez, A., Andrés, C., Jardón, S., Álvarez, R., Pendás, F., Loredó, J., 2009. *Aprovechamiento de las aguas subterráneas como recurso hídrico y energético*. Informe para la Fundación MAPFRE por la concesión de una ayuda a la Investigación.
- Ordóñez, A., Jardón, S., Álvarez, R., Andrés, C., Pendás, F., 2012. *Hydrogeological definition and applicability of abandoned coal mines as water reservoirs*. Journal of Environmental Monitoring, 14: 2127-2136.
- Oria, I., 2021. *Casi el 40% de los acuíferos seguirá contaminado en 2039*. Agua y Medio Ambiente, 83: 6-9.
- Oria, I., 2022. *El Gobierno refuerza su apuesta por la economía circular*. Agua y Medio Ambiente, 95: 6-10.
- Pendás, F., Loredó, J., 2006. *El agua en los procesos de cierre de minas en Asturias*. 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.
- Pendás, F., Loredó, J., Ordóñez, A., 2002. *Exploración, evaluación y explotación de meta-no en capas de carbón*. Ed. Instituto Geológico y Minero de España, Vol. 1, 224 p.
- Peralta, E., Breede, K., Falcone, G., 2015. *Geothermal heat recovery from abandoned mines: a systematic review of projects implemented worldwide and a methodology for screening new projects*. Environmental Earth Sciences, 73: 6783-6795.
- Pérez-Bustamante, R., 2015. *Las Caldas de Oviedo: De hospital de caridad a balneario de lujo (1773-1860)*. Tesis doctoral. Universidad de Salamanca, 309 p.
- PIRAMID Consortium, 2003. *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. Newcastle Upon Tyne, UK, 166 p.
- Raymond, J., Therrien, R., 2008. *Low-temperature geothermal potential of the flooded Gaspé Mines, Québec, Canada*. Geothermics, 37: 189-210.
- Renz, A., Rühaak, W., Schätzl, P., Diersch, H.J.G. 2009. *Numerical modelling of geothermal use of mine water: challenges and examples*. Mine Water and the Environment, 28: 2-14.
- Rivas, F., Almazán, J.L., García, J.R., 2006. *Creación de un lago artificial en el hueco generado por la explotación de la mina de lignito a cielo abierto de As Pontes de García Rodríguez (A Coruña)*. Comunicación presentada al III Congreso de Ingeniería civil, territorio y Medio Ambiente. Zaragoza, 11 p.
- Rogoz, M., 1978. *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).
- Surminas, 2022. *La reactivación minera mueve una inversión de 2.300 millones*. Colegio Oficial de Ingenieros de minas del Sur. https://surminas.org/noticias/c/Noticias-La_reactivacion_minera_mueve_una_inversion_de_2300_millones

- Verhoeven, R., Willems, E., Harcouët-Menou, V., De Boever, E., Hiddes, L., Veld, P. Demolin, E., 2014. *Minewater 2.0 project in Heerlen the Netherlands: Transformation of a geothermal mine water pilot project into a full scale hybrid sustainable energy infrastructure for heating and cooling*. Energy Procedia, 46: 58-67.
- Walls, D.B., Banks, D., Boyce, A., Burnside, N., 2021. *A review of the performance of mine-water heating and cooling systems*. Energies, 14, 6215.
- Watzlaf, G., Schroeder, K., Kleinmann, R., Kairies, C., Nairn, R., 2004. *The Passive Treatment of Coal Mine Drainage*. DOE/NETL-2004/1202. Springfield, VA.: National Technical Information Service, 72 p.
- Watzlaf, G.R., Ackman, T.E., 2006. *Underground mine water for heating and cooling using geothermal heat pump systems*. Mine Water and the Environment, 25: 1-14.
- Weisgerber, G., 1979. *Das römische Wasserheberard aus Rio Tinto in Spanien im British Museum London*. Anschnitt, 2-3: 37-80.
- Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L., Alley, W.M., 1998. *Ground water and surface water -a single resource*. US Geol. Survey Circular, 1139, 79 p.
- Wolkersdorfer, C., 2008. *Water management at abandoned flooded underground mines: Fundamentals, Tracer tests, Modelling, Water treatment*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Younger, P.L., 1997. *The longevity of minewater pollution: A basis for decision-making*. Science of the Total environment, 194/195: 457-466.
- Younger, P.L., Banwart, S.A., Hedin, R.S., 2002. *Mine Water. Hydrology, Pollution, Remediation*. Kluwer Ac. Publ. Reino Unido, 442 p.



AGUA, MINA Y ECONOMÍA CIRCULAR

1. Introducción.....	5
2. Recursos hídricos.....	9
2.1. Agua, fuente de vida.....	9
2.2. Referencias culturales. Agua y (pre) románico en Asturias.....	10
2.3. El agua subterránea.....	12
2.4. De los albores de la ciencia a la Hidrogeología moderna.....	15
2.5. Recursos hidrogeológicos de Asturias.....	17
2.6. Aguas minerales y termales.....	24
3. El agua y la mina.....	29
3.1. Efectos hidrogeológicos de la actividad minera. Paradigma de la minería de carbón en Asturias.....	30
3.2. Desagüe de las explotaciones activas.....	32
3.3. Inundación de los huecos mineros.....	36
3.4. La formación del “embalse minero subterráneo”.....	37
3.5. Caracterización hidrogeológica del embalse minero.....	39
3.5.1. Estimación de la recarga del embalse.....	39
3.5.2. Cálculo de la capacidad del embalse.....	40
3.5.3. Modelo conceptual.....	41
3.6. Calidad del agua de mina.....	42
4. La economía circular.....	45
4.1. La economía circular del agua.....	46
4.2. El agua de mina como recurso hídrico.....	47
4.3. El agua de mina como recurso energético geotérmico.....	50
4.3.1. Modelización.....	54
4.3.2. Lecciones aprendidas.....	56
4.4. El agua de mina como recurso energético hidráulico.....	57
4.5. Sistemas de almacenamiento de energía. La mina como una batería gigante.....	58
4.6. Otros aprovechamientos.....	61
5. Conclusión.....	63
6. Bibliografía.....	65

PROGRAMA DEL ACTO ACADÉMICO 2022-2023

Memoria del curso académico 2021-2022

Lectura por el Sr. Secretario General

Lección inaugural
"Agua, mina y economía circular"

Impartida por la Dra. Almudena Ordóñez Alonso
Catedrática del Área de Prospección e Investigación Minera
Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo

Intervenciones

Sr. Rector

Sr. Presidente del Principado



Universidad de
Oviedo