ILUSTRE COLEGIO OFICIAL DE GEÓLOGOS

LA PROFESIÓN DE GEÓLOGO

LA PROFESIÓN DE GEÓLOGO

ILUSTRE COLEGIO OFICIAL
DE GEÓLOGOS
1978 - 2018
40 AÑOS DEFENDIENDO LA PROFESIÓN

© de los textos: sus autores, 2018
© de las imágenes: sus autores, 2018
© de la edición: Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, Madrid, 2018

ISBN: 978-84-920097-9-4

Gestión editorial: Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, Madrid, 2018
Impreso en España.

Reservados todos los derechos.

Índice

Prólogo 1
Manuel Regueiro González-Barros

El geólogo y la seguridad 5
José Luis González

El geólogo en los riesgos naturales 17
Miguel Ángel Rodríguez Pascua, Andrés Díez Herrero Raúl Pérez López
y Nieves Sánchez Jiménez

El geólogo en los almacenamientos profundos 43
Enrique Hernández Parras y Juan Klimowitz Pícola

El geólogo y la hidrogeología 57
Marc Martínez Parra

El geólogo geofísico 81
Enrique Aracil Ávila

El geólogo marino 97
Teresa Medialdea y Luis Somoza

El geólogo cartógrafo 117
Roberto Rodríguez Fernández y Alejandro Robador Moreno

El geólogo en la exploración y explotación minera 139
Manuel Regueiro y Roberto Oyarzun

El geólogo en la Ingeniería Geológica 165
José Alberto López Chinarro

El geólogo paleontólogo 179
Alfonso Arribas

El geólogo en el Geoturismo 183
Gabriel Chicote Alvira y Ruth Hernández Paredes

El geólogo gemólogo 207
Cristina Sapalski Roselló

Prólogo

Manuel Regueiro González-Barros
Presidente del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (ICOG)

A pesar de que la geología es etimológicamente el estudio (logia) de la Tierra (Gea), en realidad el estudio de la Tierra no es una ciencia única, es más bien una ciencia de ciencias y por eso se denominan, más apropiadamente, las ciencias geológicas. Desde el punto de vista científico estas cubren el amplísimo campo de los estudios para conocer en profundidad la Tierra, sus circunstancias históricas y su dinámica actual y futura. Hablamos de disciplinas básicas como la Cristalografía, la Estratigrafía, la Mineralogía, la Paleontología, la Petrología, la Sedimentología, la Tectónica, la Vulcanología, la Geomorfología, la Gemología, la Geofísica, la Geoquímica, la Geología Histórica, la Hidrogeología, o aplicadas, como la Geología del petróleo, la Geología Económica, la Geología minera, la Geología ambiental, la Geología estructural, la Geología planetaria, la Geología regional, la Ingeniería geológica o la Sismología, por citar solo algunas.

Armados con esa fantástica formación científica y técnica, los geólogos trabajan hoy en día en una multitud de sectores de la sociedad, formativos, judiciales, industriales, técnicos y administrativos o sociales, tales como: auditorías y/o informes periciales, consultoría geológica, contaminación de suelos, educación y/o formación, energía e hidrocarburos, estudios geológicos básicos y cartográficos, geofísica aplicada, geotermia, geoturismo, hidrogeología y recursos hídricos, impacto y restauración ambiental, infraestructura geológica, ingeniería geológica y geotecnia, medio ambiente, paleontología aplicada, patrimonio geológico y geodiversidad, recursos geológicos y geomineros, recursos minerales, riesgos naturales, sondeos y perforaciones, suelos contaminados,

vertederos y gestión de residuos, planificación del territorio, funcionarios en la administración general del estado y sus OO.AA., funcionarios de comunidad autónoma, funcionarios de la administración local, geología médica y forénsica, geocronología, Geología urbana, Geoética, gestión de datos (Geología 3D, Sistemas de Información Geográfica, sensores remotos) o incluso últimamente en Geología humanitaria.

Para cubrir tan sorprendentemente inmenso campo de actividades, los geólogos usan multitud de métodos, todos basados en el método científico, con el objetivo final de realizar el modelo geológico del entorno a estudiar. Entre ellos los trabajos de campo (cartografía geológica o geomorfológica a diferentes escalas y muestreos y ensayos de campo), la descripción de las rocas y los minerales y sus propiedades, los ensayos de laboratorio, las técnicas geofísicas y geoquímicas, los modelos numéricos, los sistemas de información geográfica y la teledetección, entre muchos otros.

Los procesos geológicos son la base sobre la que descansan los ecosistemas y, por lo tanto, la Geología modela las condiciones en las que vivimos y la diversidad geológica es, sin duda, una de las claves de la conservación del planeta. Para los hombres, preocupados ahora cada vez más por un desarrollo armónico y sostenible del mismo en el marco de la economía denominada circular y con los ojos puestos en los objetivos de desarrollo del milenio de las Naciones Unidas, olvidando el imposible y probablemente peligroso crecimiento sostenido, cada vez tendrá que tener más en cuenta a la Geología y a sus protagonistas.

Pero, a pesar de que estas ciencias son necesarias para la sociedad, los temas geológicos no están bien identificados o se incluyen dentro de otros temas ambientales, lo cual al final cuesta dinero y vidas por decisiones incorrectas en las grandes o pequeñas obras constructivas o el mal uso de los recursos naturales. Además, siempre se nos busca a los geólogos para que expliquemos, a posteriori, las razones de algunos desastres naturales (terremotos, inundaciones, erupciones volcánicas, erosión costera a causa de los temporales, deslizamientos, hundimientos o colapsos del terrero) o las perentorias necesidades de recursos geológicos, incluidas las aguas subterráneas, en lugar de hablar de cómo planificar correctamente el uso de los recursos o cómo prevenir los citados riesgos geológicos. Y a pesar de que cada vez más veces se nos pregunta por otros aspectos de esta ciencia como el cambio climático, el patrimonio geológico y la geodiversidad, sigue siendo una ciencia relativamente desconocida por el gran público, por lo que se hace necesario seguir insistiendo en la infinidad de cosas que hacen los geólogos, que siempre han centrado sus esfuerzos científicos y técnicos en la sociedad a la que sirven.

Los geólogos son unos técnicos capacitados sí, pero sobre todo unas personas con una formación extraordinaria y diferenciada, con un objetivo personal que no es solo el de aplicar sus conocimientos, sino esa satisfacción personal de tenerlos,

que además les da una visión distinta de la realidad, del mundo y de su entorno.

Este libro es la segunda edición corregida y aumentada de una primera edición publicada por el ICOG en 2009 y se edita con motivo del 40 aniversario del Colegio (1978-2018). Se ha contado con algunos de los autores de la anterior edición, que han sido tan amables de revisar y actualizar sus textos y se han incluido otros que han desarrollado nuevos capítulos sobre la ingeniería geológica, la seguridad, el geoturismo, la oceanografía o el almacenamiento geológico, no incluidos en la edición anterior. Con ello ambos libros de complementan y dan una visión global de los trabajos de los geólogos en una gran mayoría de los campos que hoy ejercen con solvencia y profesionalidad en nuestro país.

El geólogo y la seguridad

José Luis González García
Analista de Seguridad y Defensa

Existen numerosos ámbitos securitarios en donde los geólogos pueden desarrollar directamente funciones de estudio, asesoramiento y ejecución en el campo de la seguridad. Es el caso de la geología militar, la geología forense o la geología aplicada a la seguridad pública. Los geólogos pueden desempeñar una labor profesional a través de diferentes cuerpos funcionariales o de unidades militares (arma de ingenieros de los ejércitos, unidad militar de emergencia, cuerpos y fuerzas de seguridad, bomberos, plantillas de los servicios de protección civil, etc.).

En otros casos, la labor securitaria de los geólogos se realiza de forma indirecta en el sector público o privado, a través de actividades de apoyo y en el marco de ámbitos concretos de la seguridad, tales como la seguridad hídrica, la seguridad ambiental o la seguridad de las infraestructuras públicas.

Aunque no existe una definición formal sobre seguridad geológica que se refiera a la aportación de las ciencias geológicas en el campo de la seguridad, creemos que la importancia de estas disciplinas es clave para el desarrollo de una seguridad moderna y coherente con los futuros desafíos a los que nos enfrentamos.

La seguridad no es un concepto ontológico sino que cambia con el tiempo y forma parte de un debate casi permanente. Hace unos años, la doctrina sobre seguridad se refería a

acciones concretas para garantizar el orden interno de un Estado o la defensa del territorio frente a agresiones exteriores. Hoy, los riesgos para la seguridad nacional son mucho más diversos y transversales (tabla 1); y la seguridad abarca diferentes dimensiones que incluyen, no solo aspectos políticos o militares, sino otros muchos de carácter económico, social, ambiental y tecnológico.

Riesgos, amenazas y factores subyacentes de la seguridad nacional		
FACTORES SUBYACENTES	RIESGOS Y AMENAZAS	FACTORES SUBYACENTES
	Conflictos	
	Terrorismo	
Extremismos ideológicos	Ciberamenazas	Desequilibrios demográficos
	Crimen organizado	
	Inestabilidad económica	
Pobreza	Vulnerabilidad energética	Cambio climático
	Proliferación de armas NBQR	
	Migraciones irregulares	
Desigualdad	Espionaje	Uso nocivo de la tecnología
	Emergencias y catástrofes	
	Vulnerabilidad marítima	
	Infraestructuras críticas	

Tabla 1. Riesgos, amenazas y factores subyacentes identificados en la Estrategia de Seguridad Nacional de España (2013).

En esta concepción, las ciencias geológicas aportan valor en ámbitos de la seguridad tan variados como la prevención de catástrofes, la criminalística, las ciencias forenses, el análisis de inteligencia, el control de la proliferación nuclear, la resolución de controversias de soberanía marítima o la seguridad del almacenamiento de residuos de alto riesgo (tabla 2).

El objetivo de este capítulo es identificar un campo de actividad profesional poco conocido pero fundamental. Muchos de los grandes problemas para el futuro de la humanidad, como el cambio climático, el incremento del impacto de las catástrofes o el agotamiento de los recursos naturales, son desafíos de seguridad que también constituyen retos para las ciencias geológicas. La aportación científica puede ayudar a identificar cómo afectarán estos cambios a nuestro futuro y contribuir a la resolución de los problemas planteados.

Sin embargo, la interdisciplinariedad y el intercambio de ideas con otros especialistas no se consideran de forma suficiente en el mundo académico. Con frecuencia, muchos

científicos que trabajan o intervienen en determinados temas de seguridad y gestión de riesgos desconocen las prácticas y los principios organizativos del sector de la seguridad. Por lo tanto, es imprescindible extender el conocimiento de los profesionales de la Geología a los conceptos, teorías y métodos de las diferentes disciplinas que entran en juego.

ÁMBITOS DE LA SEGURIDAD	APORTACIONES DE LAS GEOCIENCIAS
Seguridad planetaria	• Estudio de calentamientos globales previos (geología histórica) • Impacto del calentamiento global en los ecosistemas. • Impacto en los recursos hídricos y seguridad alimentaria. • Impacto de la subida del nivel del mar.
Defensa Nacional	• Influencia táctica de la geología en operaciones militares • Estudios para la construcción de fortificaciones y excavaciones subterráneas, asentamiento de artillería y aeródromos.
Lucha contra el terrorismo y crimen organizado	• Monitorización sísmica de explosiones en ataques terroristas. • Análisis de estructuras del subsuelo para detección de armas, enterramientos clandestinos y cavidades uso ilícito (geofísica).
Seguridad económica y ambiental	• Evaluación de minerales estratégicos. Seguridad de suministro. • Impacto de los procesos de desertificación y erosión del suelo. • Disponibilidad de recursos hídricos.
Seguridad energética	• Recursos de origen geológico y seguridad del suministro. • Almacenamiento estratégico y almacén geológico profundo. • Captura y almacenamiento de carbono.
Seguridad internacional y lucha contra la proliferación	• Conocimiento geológico para la resolución de controversias de soberanía en la plataforma continental (geología marina) • Detección de ensayos nucleares y evaluación del rendimiento de dispositivos (técnicas sísmicas, hidroacústica, infrasónica).
Seguridad de las migraciones	• Influencia de la vulnerabilidad climática y de los factores ambientales en las crisis migratorias. • Análisis del agravamiento de los problemas migratorios por efecto de catástrofes naturales.
Protección ante emergencias y catástrofes	• Evaluación de riesgos naturales y apoyo a la gestión. • Comunicación del riesgo y cultura de seguridad.
Seguridad marítima	• Actividad geológica en las dorsales oceánicas y zonas de transición entre continentes y dominio marítimo. • Impacto de los procesos erosivos de destrucción del litoral.
Protección de infraestructuras críticas	• Impacto de peligros naturales en infraestructuras críticas. • Impacto de amenazas en infraestructura espacial.

Tabla 2. Algunas aportaciones de las Geociencias en diferentes ámbitos de la seguridad.

En este capítulo no es posible realizar un examen detallado del conjunto de actividades profesionales que un geólogo puede realizar en el campo de la seguridad. Por ello, se han seleccionado a título de ejemplos tres aportaciones de singular interés:

- Geología en el ámbito de las ciencias forenses.
- Información geológica en el análisis de inteligencia.
- Geología y seguridad internacional.

Geología en el ámbito de las ciencias forenses

La geología forense es una herramienta auxiliar de la investigación criminal. Para ello, el geólogo identifica, analiza y compara diferentes materiales geológicos (trazas) presentes en la escena del crimen con otras muestras halladas en un sospechoso, víctima, vehículo u objeto relacionado con la investigación (Donnelly, 2010). El propósito de esta comparación es establecer un grado de asociación entre una persona u objeto y determinada ubicación específica. Tales evidencias pueden constituir una prueba pericial susceptible de ser presentada ante un tribunal en el marco de un proceso judicial.

El fundamento de la geología forense se basa en la aplicación de los principios de las ciencias criminalísticas utilizando materiales geológicos. Para ello, se parte de un criterio básico que tiene que ver con la transferencia de materiales denominado "principio de intercambio de Locard". Este principio sostiene que en dos objetos que han estado en contacto siempre hay una transferencia de materiales. Tales objetos pueden ser el propio entorno de la escena del crimen, la víctima, el sospechoso, sus zapatos, automóviles o cualquier otro objeto. Los materiales geológicos transferidos abarcan desde el polvo, fragmentos de roca, minerales, cenizas o cualquier otro material presente en la escena del crimen.

Aunque lo más común es la utilización de muestras de sedimentos y partículas del suelo como trazas, otras aplicaciones de la geología forense incluyen el uso de técnicas geofísicas y de sensores remotos para localizar tumbas clandestinas, depósitos de armas u otros objetos enterrados.

La geología forense es un concepto integrador basado en gran medida en métodos y técnicas de numerosas disciplinas que, a veces, van más allá de las ciencias experimentales (fig. 1). Es lógico que así sea. La superficie de la Tierra ha sido intensamente modificada por actividades humanas y existen pocas áreas en donde el suelo pueda considerarse completamente natural. Los materiales geológicos pueden ser transportados de una zona a otra con fines económicos. Por ello, la investigación geológica forense implica algo más que una simple comparación de muestras e incluye un conocimiento completo de las actividades antrópicas previas al momento del crimen.

El valor de las evidencias geológicas en el proceso de investigación criminal se reconoce desde hace más de un siglo. El profesor austriaco Hans Gross fue el primero en llamar la atención sobre el valor del estudio microscópico de minerales en muestras de polvo y suciedad en zapatos de sospechosos de un delito. También Arthur Conan Doyle, creador del detective de ficción Sherlock Holmes, utilizó en alguna de sus obras la comparación de muestras de suelo para la resolución de casos criminales.

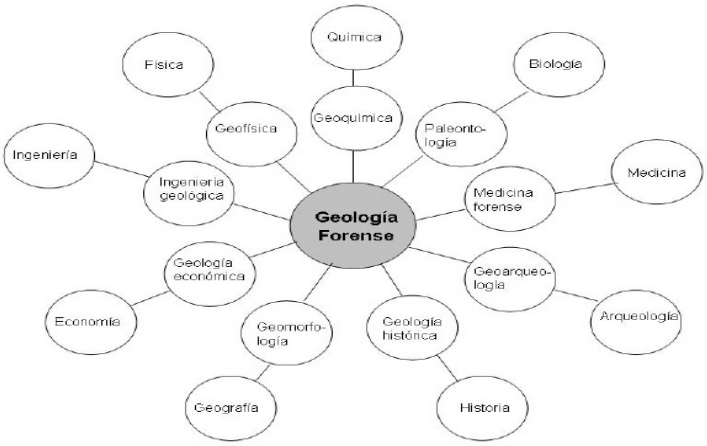

Fig. 1. Relación entre la geología forense y otras disciplinas.

El primer libro sobre geología forense fue publicado en 1975 por Ray Murray y John Tedrow, bajo el título *Evidence from the Earth*. F*orensic Geology and Criminal Investigation*. Posteriormente fue reeditado por Murray bajo el mismo título. Es una mezcla de libro de texto y compendio divulgativo sobre numerosos casos mediáticos que han sido resueltos con ayuda de evidencias geológicas.

El asesinato de John Dodson, en Colorado, es uno de los casos más interesantes en la historia de la geología forense. La evidencia geológica (restos de bentonita encontrada en los zapatos y *jeans* de Janice Dodson) fue inequívoca y vinculó a la sospechosa directamente en el crimen eliminando su coartada.

Fig. 2. Sedimentos arcillosos con bentonita que sirvieron de evidencia geológica en el caso del asesinato de John Dodson. Fuente: Ray Murray.

En los últimos años, la geología forense está experimentando cierto renacimiento gracias al uso de nuevas técnicas analíticas. También existe un importante impulso académico e institucional, especialmente en países anglosajones. Y se ha incrementado la cooperación entre geólogos y otros científicos forenses, como arqueólogos y genetistas. Una revisión integral de la geología forense ha sido compilada por Pye and Croft (2004) y por Ruffell y McKinely (2008).

También se han adoptado iniciativas a nivel internacional. Por ejemplo, la Iniciativa sobre Geología Forense, auspiciada por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas, engloba a más de cien países. Su finalidad es impulsar y promover las aplicaciones de esta disciplina en los servicios de policía científica y criminalística de todo el mundo.

Proceso de investigación geológica en la escena del crimen

La función de los servicios de criminalística comienza a desarrollarse en la escena del crimen mediante el reconocimiento y la recogida de las pruebas materiales. Continúa con su análisis y la evaluación de los resultados en el laboratorio, y concluye con la presentación de las conclusiones periciales ante las autoridades judiciales.

Los geólogos que intervienen en el proceso deben contar con suficientes conocimientos sobre las ciencias forenses y las metodologías del proceso de investigación y laboratorios de criminalística.

El reconocimiento, la recogida y la preservación de las pruebas es la parte fundamental del trabajo que se realiza en la escena del crimen. Su objetivo es localizar e identificar el mayor número posible de pruebas materiales y salvaguardar la integridad de las muestras. Documentar el estado inicial de la escena de forma cronológica y minuciosa también es esencial, ya que permite velar por la “trazabilidad” y la “continuidad” de las pruebas durante el proceso de investigación.

Un aspecto fundamental en el análisis geológico forense lo constituye el procedimiento de la toma de muestras. Rige el principio denominado “el frágil espacio de la prueba”, que se refiere a la vulnerabilidad del muestreo y a la custodia de las evidencias (Schiro, 1998). Para ello, existen protocolos de “cadena de custodia” específicos en cada campo analítico.

En el estudio pericial se comparan las muestras que ofrecen dudas, recogidas a través de la víctima, sospechoso o de otros objetos, con las muestras de referencia. La finalidad del proceso es encontrar una evidencia que pueda servir para establecer la verdad del hecho delictivo.

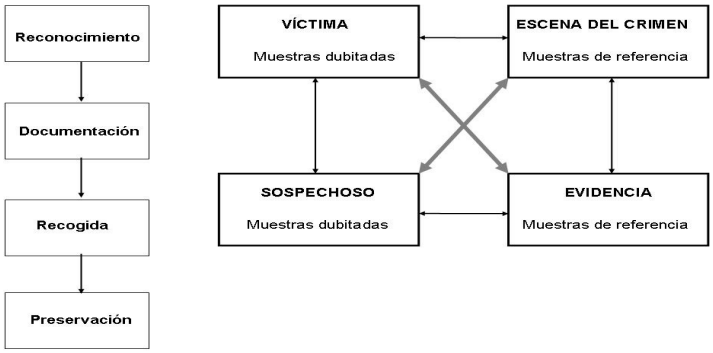

Fig. 3. Proceso del estudio pericial y análisis de comparación de muestras forenses.

Información geológica en el análisis de inteligencia

El análisis de inteligencia es un proceso orientado al ámbito de la seguridad nacional, cuyo objetivo es la creación de conocimiento a partir de diferentes fuentes. Para ello, el analista explota la información mediante un procedimiento sistemático que incluye actividades de recolección, valoración, análisis, integración e interpretación. El producto elaborado se difunde y contribuye a conformar la toma de decisiones por parte de diferentes responsables políticos, militares o económicos.

Dependiendo de la temática se puede hablar de diferentes ámbitos de inteligencia: militar, económica, sociológica, política, tecnológica y geológica. El objetivo básico de la inteligencia geológica es analizar la naturaleza del terreno, las rocas y estructuras que lo condicionan y los procesos que tienen lugar en la Tierra, su finalidad es determinar los efectos del medio físico en diferentes ámbitos de la seguridad y, en su caso, establecer líneas apropiadas de actuación.

Inteligencia geológica

Históricamente, la inteligencia geológica ha sido un proceso vinculado al ámbito militar, ya que de las características del terreno se pueden derivar consideraciones tácticas (Underwood, 1998). Existen cinco aspectos clave con incidencia geológica que deben tenerse en cuenta a la hora de analizar la influencia táctica del terreno en una operación militar: la posición de las fuerzas, la movilidad, las condiciones del sustrato, la presencia de recursos naturales y la posibilidad de que fenómenos naturales extremos puedan poner en riesgo las operaciones.

En la tabla 3 se destacan como ejemplo diferentes operaciones históricas en donde estos aspectos resultaron esenciales para el desarrollo de una campaña militar.

Operaciones militares	Influencia táctica de la geología
Batalla de Monte Casino (II Guerra Mundial)	• Posiciones defensivas aprovechan el conocimiento geológico. • La naturaleza arcillosa del valle del Liri y las lluvias retrasan el avance aliado.
Batalla de Normandía (II Guerra Mundial)	• Influencia de la sedimentología del litoral en el desembarco. • Utilidad de los estudios geológicos en el apoyo logístico (construcción de aeródromos, canteras y suministro de agua). • Influencia de la geomorfología del interior de Normandía en la movilidad de los aliados.
Batalla de Inglaterra (II Guerra Mundial)	• Efecto de las condiciones geotécnicas en el emplazamiento de aeródromos para la defensa aérea de Gran Bretaña.
Campaña de África (II Guerra Mundial)	• El conocimiento geológico facilita la provisión de recursos para el abastecimiento de unidades especiales en el desierto.
Batalla de Passchendaele (I Guerra Mundial)	• Las lluvias torrenciales y la naturaleza del terreno condicionan el fracaso de la operación británica en Flandes.

Tabla 3. Ejemplos de operaciones militares con influencia táctica de la geología.

La utilización militar de peligros geológicos inducidos también ha sido habitual a lo largo de la historia. Un tercio de las inundaciones producidas en Holanda entre los años 1500 y 2000 no se produjeron por fuertes lluvias o grandes tormentas sino como resultado de acciones militares (Kraker, 2015). En el pasado, en períodos de guerra, los holandeses habrían destruidos los diques y malecones para defender su territorio de ejércitos enemigos. El agua que inundaba el área impedía avanzar al adversario. Sin embargo, este tipo de operaciones son tácticas de alto riesgo. Además de la pérdida de vidas y los daños económicos, las inundaciones inducidas militarmente en Holanda provocaron fenómenos de salinización del suelo e incrementaron los procesos de erosión y sedimentación.

En la actualidad, los factores geológicos y ambientales siguen teniendo un papel fundamental en los temas de defensa y seguridad internacional. La preocupación por la proliferación de nuevas armas y el uso cada vez más extendido de instalaciones militares subterráneas ha promovido el desarrollo de nuevos programas de inteligencia geológica, dirigidos a evaluar la vulnerabilidad del material rocoso donde se sitúan estos emplazamientos.

Los geólogos compilan lo que Eastler (1998) denomina “inteligencia geológica estratégica”, que permite evaluar la vulnerabilidad geológica en base a información sobre profundidad, caracterización litológica, meteorización y desarrollo del suelo, propiedades mecánicas, relación peso/volumen y penetrabilidad ante proyectiles de tipo GBU-28 o bunker *buster*. El análisis de las propiedades de la roca se realiza en el laboratorio y posteriormente se extrapola bajo diferentes condiciones de meteorización.

La inteligencia geológica también se nutre de otras disciplinas, como la geografía, las

ciencias ambientales o la geofísica. Es habitual que los geólogos trabajen en equipos multidisciplinares formados por diferentes profesionales (analistas de imágenes, geofísicos, expertos militares, etc.), ya que la evaluación de cada escenario puede revestir una gran complejidad y el uso de diferentes técnicas.

Durante la guerra de Afganistán, por ejemplo, los grupos insurgentes tomaron ventaja de la oportunidad que ofrecían las estructuras geológicas del terreno. Construyeron una profunda y vasta red de túneles en areniscas y rocas metamórficas conectadas con las cavidades de las formaciones kársticas. De esa forma, la configuración y profundidad de muchos emplazamientos subterráneos representó un reto para la inteligencia geológica, especialmente en la zona de las Montañas Blancas de Tora-Bora y en la región de Zawar Kili.

Otro de los retos actuales de la inteligencia geológica es la proliferación nuclear. El Tratado de Prohibición Completa de Ensayos Nucleares impide la realización de ensayos en y por los países firmantes. Para vigilar el cumplimiento del tratado se cuenta con un sistema internacional de vigilancia, que consiste en una red de sensores repartidos por todo el mundo que son capaces de detectar los efectos producidos por una explosión nuclear. El sistema se basa en el empleo de técnicas de detección sísmica, hidroacústica, infrasónica y de radionucléidos, que permiten caracterizar el rendimiento de la explosión, su localización y, en algunos casos, el tipo de dispositivo ensayado. De esta forma se puede dimensionar la magnitud de las nuevas amenazas nucleares.

Geología y seguridad internacional

Las ciencias geológicas también contribuyen a resolver las controversias territoriales. Por ejemplo, en el marco de la Convención de Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, en donde se establece que los Estados costeros tienen derecho a fijar los límites de soberanía sobre su plataforma continental más allá de las 200 millas, la geología permite aportar argumentos técnicos para demostrar si el dominio que se extiende más allá de las 200 millas desde la costa, tiene la misma estructura y material geológico que el territorio emergido más próximo. De esta forma se facilita la resolución de posibles disputas entre Estados en conflicto.

Un ejemplo de las posibilidades de la geología para dirimir los actuales conflictos de intereses que se desarrollan en el océano Ártico es la dorsal de Lomonósov, que se eleva entre el norte de Groenlandia y el mar de Laptev. Mediante el análisis geológico puede demostrarse si esta estructura es o no una extensión de la plataforma continental de alguno de los países en litigio (Rusia, Dinamarca y Canadá). La resolución de esta controversia, pendiente de dictamen en la Comisión de Límites de la Plataforma Continental de Naciones

Unidas, permitiría garantizar la futura estabilidad de una región que, por la abundancia de sus recursos naturales, puede ser en el futuro una fuente de conflictos.

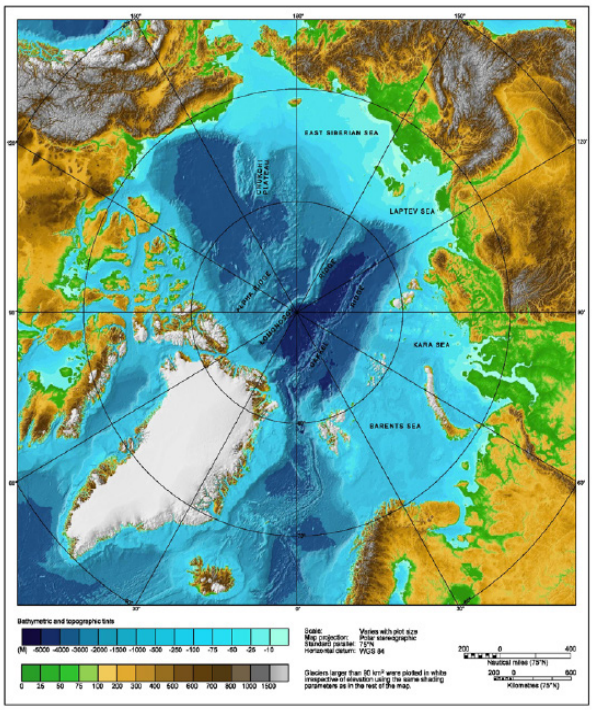

Fig. 4. Mapa batimétrico/topográfico del océano Ártico y situación de la dorsal de Lomonósov. Fuente: US National Oceanic and Atmospheric Administration.

Cambio climático

Otro tema especialmente sensible que está transformando la noción de seguridad es el cambio climático. A lo largo de la historia de la Tierra el clima ha variado, reflejando las complejas interacciones y dependencias de los sistemas del planeta. Durante el último millón de años, nuestro mundo ha experimentado ciclos de calentamiento y enfriamiento, con oscilaciones de las temperaturas medias globales de unos 5 ºC aproximadamente. Pero desde hace unos 11.000 años el clima se ha estabilizado y apenas ha habido fluctuaciones de temperatura. Este hecho, ha promovido la aparición de la agricultura y el inicio de la civilización humana.

En los últimos cien años se ha observado un incremento de las temperaturas globales, que la mayor parte del consenso científico atribuye a un cambio en el comportamiento de la atmósfera por la introducción de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero.

En el siglo XXI los científicos esperan que la temperatura de la Tierra continúe aumentando.

Es probable que el incremento sea mayor que en el siglo XX. Este calentamiento tendrá un gran impacto en los sistemas naturales y humanos. En un mundo más caliente, el acceso a recursos hídricos (figura 5), alimentarios y energéticos se modificará sustancialmente. Es de esperar que la salud, la biodiversidad, la estabilidad económica, las infraestructuras costeras, las migraciones humanas y algunos riesgos naturales extremos resulten afectados.

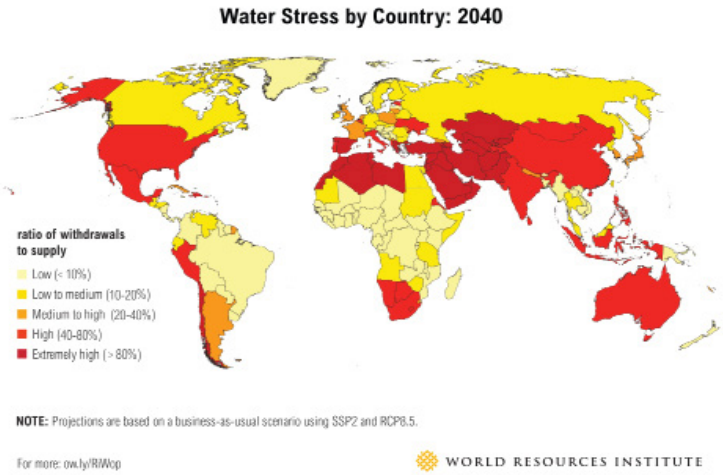

Fig. 5. Mapa de estrés hídrico por países hacia 2940. Fuente: World Resources Institute.

Estos cambios agravarán la competencia por los recursos naturales y podrían incrementar los conflictos humanos. Por lo tanto, el cambio climático se está configurando como un potenciador de inestabilidad internacional, que acelera sustancialmente los factores subyacentes de inseguridad e influye decididamente en todos los componentes fundamentales de la Seguridad Nacional (defensa, seguridad pública y acción exterior) y en gran parte de los ámbitos de especial interés. En España, la Ley de Seguridad Nacional aprobada en 2015 ha identificado entre estos ámbitos a la seguridad económica, marítima, ambiental, sanitaria, energética, y seguridad de los flujos migratorios.

Llama la atención que el primer gran estudio sobre seguridad y cambio climático fuera encargado por el Pentágono, y que uno de los estudios más influyentes en el campo de la seguridad climática haya sido dirigido por un grupo de generales y almirantes (CNA, 2007). Este informe, que caracteriza al cambio climático como un “multiplicador de amenazas” fue uno de los detonantes que sirvió para elevar de forma significativa la implicación del proceso del cambio climático en las agendas de seguridad nacional y de política exterior.

Es importante resaltar que la preocupación del sector militar de Estados Unidos sobre el cambio climático, además de adoptar los postulados científicos del Panel

Intergubernamental del Cambio Climático, también se basa en consideraciones tanto de índole estratégica como tácticas. Los cambios ambientales no solo implican un posible deterioro de la estabilidad y seguridad internacional, sino un eventual impacto en infraestructuras militares y en la eficiencia de eventuales operaciones. Por todo ello, las ciencias de la Tierra y medioambientales seguirán teniendo en el futuro una función esencial como fuente de conocimiento y de apoyo en la gestión de la seguridad nacional e internacional.

Referencias bibliográficas

CNA Military Advisory Board (2007). National Security and the threat of climate change. Alexandria, VA.

Donnelly, L.J. (2010). The role of geoforensic in policing and law enforcement Emergency Global Barclay Media Limited. January, 19-22.

Eastler, T. E., Percious, D. J. y Fisher, P. R. (1998). Role of geology in assessing vulnerability of underground fortifications to conventional weapons attack. Review in Engineering Geology, 1998, 13, 173-188.

Gobierno de España (2013). Estrategia de Seguridad Nacional. Una responsabilidad de todos. 88 pp.

Kraker, A.M.J. (2015). Flooding in river mouth: human caused or natural events? Five centuries of flooding events in the SW Netherland, 1500-2000. Hydrol. Earth. Syst. Sci., 19, 2673-2684.

Murray, R. C. (2011). Evidence from the Earth. Forensic geology and criminal investigation. Mountain Press Publishing Company. 200 pp.

Pye, K. y Croft, D.J. (2004). Forensic Geoscience: Principles, techniques and applications. Geological Society. London. 327 pp.

Ruffell, A. y McKinley, J. (2008). Geoforensics. John Wiley & Sons, Ltd. 346 pp.

Schiro, G. (1998). Collection and preservation of evidence. Lousiana State Police Crime Laboratory.

Underwood, J.R. y Guth, P. (1998). Military Geology in war and peace (Reviews in Engineering Geology) Geological Society of America 225 pp.

El geólogo en los riesgos naturales

Dr. Miguel Ángel Rodríguez Pascua; Dr. Andrés Díez Herrero; Dr. Raúl Pérez López; Dra. Nieves Sánchez Jiménez
Instituto Geológico y Minero de España

Desde que se escribió la primera edición de este libro han tenido lugar una gran cantidad de eventos catastróficos que han generado problemas a la sociedad a nivel mundial. Caben destacar los terremotos de Wenchuan (China, 2008), Haití (2010), Tohoku (Japón, 2011) y México (2017), sin olvidarnos, aunque a otra escala, del terremoto de Lorca (2011). Ha habido grandes inundaciones como las de Paquistán y China (2010), Tailandia (2011), Krasnodar (Rusia, 2012) o Arizona (EE.UU., 2014); aparte de un interminable goteo de víctimas mortales en Mozambique, Brasil, Italia, Francia... y España. O erupciones volcánicas como las del Eyjafjallajökull en Islandia en 2010, del complejo volcánico Puyehue-Cordón Caulle en 2011 y del Calbuco en 2015, ambas en Chile, o la reciente erupción del Monte Agung en Bali en 2017, y ya en territorio español la erupción submarina en El Hierro en 2011 que dio lugar a la formación del volcán Tagoro. Todas ellas afectaron de forma importante a la población, a la actividad económica, y a la sociedad en general, de forma local en unos casos y mundial en otros. Precisamente estos casos han puesto de manifiesto la necesidad del trabajo del geólogo y la aplicación de la Geología, tanto a la prevención como a la actuación sobre el terreno durante la emergencia.

Los procesos naturales se rigen por una dinámica caótica, por lo que los métodos estadísticos que se utilizan para cualcular la peligrosidad y el riesgo no reflejan de forma adecuada la realidad, por tanto debería tenerse en cuenta el proceso geológico que subyace en todos ellos. Estos mapas nacieron para las aseguradoras y ahí es donde son útiles, ya que matemáticamente son impecables, pero su errónea interpretación fuera

de este ámbito puede llevar a errores importantes. Precisamente por esto ahí es donde el geólogo hace valer su trabajo, ya que aporta algo que ninguna otra profesión puede aportar en este ámbito, que es tanto el conocimiento sobre la naturaleza del fenómeno en cuestión como su ocurrencia en el tiempo. Por este motivo, el trabajo del geólogo puede aportar datos sobre las características de catástrofes pasadas no registradas documentalmente o mediante instrumental, o cuyo registro se haya perdido, y de catástrofes futuras, teniendo una importantísima labor en la prevención. Precisamente las medidas preventivas y las de autoprotección son las que más vidas salvan en las catástrofes naturales y reducen considerablemente las pérdidas económicas. Incluso durante la catástrofe, el geólogo puede jugar un papel fundamental en el diseño de la organización de la gestión de la emergencia, como por ejemplo ocurriría en caso de terremoto, donde los efectos geológicos de los terremotos no los predicen los actuales mapas de peligrosidad.

La peligrosidad y el riesgo concebidos probabilísticamente siguen siendo útiles para empresas aseguradoras y gestores públicos, ya que fueron creados para estimar pérdidas y estudiar la viabilidad de instalaciones e infraestructuras ante catástrofes de gran envergadura. Pero lo que en un principio fue creado para las aseguradoras ahora se está utilizando para la protección del ciudadano, construcciones y patrimonio, como si fueran verdades absolutas y definitivas en el tiempo. Por ejemplo, los mapas de susceptibilidad y peligrosidad volcánicas son útiles para un momento concreto y para un peligro específico, pero deben ser periódicamente actualizados con los nuevos datos que van proporcionando los propios procesos naturales a medida que se suceden. Es decir, los mapas de peligrosidad y riesgo deben ser algo dinámico en constante actualización y no algo estático. El desarrollo histórico de la cartografía de riesgos, por ejemplo, de los mapas de inundaciones, así lo demuestra, habiendo pasado de los antiguos mapas de catástrofe o desastre, a mapas para el diseño de obras preventivas y, posteriormente, mapas de peligrosidad y riesgo (Olcina y Díez-Herrero, 2016); pero en el futuro la tendencia será hacia la incorporación del conocimiento geológico que permita acotar las incertidumbres mediante la consideración del máximo evento registrado.

Los eventos catastróficos dejan su registro en la geología y mediante el estudio de este registro cuaternario es posible identificar grandes eventos que tuvieron lugar tanto en el pasado histórico como prehistórico y reciente. Este registro geológico se encuentra principalmente en sedimentos recientes y en evidencias geomorfológicas. Los principales procesos geodinámicos y meteorológicos con capacidad de generar eventos catastróficos y registro geológico de los mismos son, entre otros:

A- Procesos geodinámicos externos

- Colapsos
- Subsidencia

- Erosión
- Deslizamientos
- Inundaciones y avenidas
- Procesos de arroyada
- Expansividad y colapsabilidad de suelos

B- Procesos geodinámicos internos

- Terremotos y maremotos (tsunamis)
- Vulcanismo
- Diapirismo

C- Procesos meteorológicos

- Lluvias torrenciales
- Huracanes
- Tornados
- Aludes

El intervalo temporal que se suele tener en cuenta en riesgos naturales abarca todo el Holoceno, pudiendo extenderse a parte del Pleistoceno, como ocurre con instalaciones nucleares (500 ka). Es por tanto, la Geología del Cuaternario la responsable del aporte de datos para la peligrosidad y posterior cálculo del riesgo. La Geología va a ser capaz de aportar nuevos datos al registro en intervalos temporales muy amplios, integrarlos y obtener mapas de peligrosidad que serán utilizados para calcular el riesgo. El hecho de localizar espacialmente zonas susceptibles de ocurrencia de eventos catastróficos tiene aplicación en ordenación del territorio y en la reducción de la vulnerabilidad de estructuras preexistentes. Por tanto, la Geología aportará datos estructurales, (por ejemplo, en el caso de las erupciones volcánicas, aportará datos como localización y forma de centros de emisión, fisuras eruptivas, fallas y diques, orientaciones de las mismas, características de los depósitos volcánicos, potencia y alcance de coladas, etc.), cuantificación de eventos y sus intensidades, periodos de retorno en intervalos temporales amplios (Pleistoceno-Holoceno), cálculo de peligrosidad y cartografía de la misma y ordenación del territorio.

El trabajo que realiza

La labor que realizará el geólogo en riesgos estará condicionada por el tipo de riesgo a tratar; pero independientemente de este, el trabajo constará de una parte teórica y de investigación, y otra práctica y aplicada. Todo este trabajo está siempre integrado dentro de equipos multidisciplinares, independientemente del tipo de riesgo a tratar. A continuación trataremos los tipos de riesgo con mayor incidencia en España, entre los que se encuentran el volcánico, sísmico, deslizamientos y el de mayor ocurrencia, las

inundaciones.

Geología de terremotos

Teniendo en cuenta esto, podemos utilizar como ejemplo uno de los riesgos más impactantes en la sociedad, como es el riesgo sísmico. En cualquier estudio de riesgos es necesario recopilar toda la información existente al respecto en la zona a estudiar, tanto registros sísmicos históricos e instrumentales como trabajos geológicos previos (cartografías geológicas y geomorfológicas, estudios geofísicos, geocronologías, etc.), siempre que estos existan. Uno de los puntos clave será la cartografía de fallas con evidencias de actividad neotectónica reciente, bien sea por criterios geomorfológicos, estratigráficos o estructurales. Bien, ya tenemos un conjunto de fallas "candidatas" a ser sismogenéticas, pero necesitamos conocer cuál es la orientación de éstas con respecto al campo de esfuerzos reciente y actual, ya que este es el responsable del movimiento de las fallas activas, por tanto, fallas preferentemente orientadas al campo de esfuerzos serán potencialmente activas. La geomorfología será, en este caso, una gran aliada para observar que fallas potencialmente activas presentan evidencias de actividad sísmica reciente. Es clave tener un control tridimensional de las fallas e hipocentros, ya que si los planos de falla tienden a ser horizontales veremos sobre el mapa "nubes" de epicentros que en superficie no se ajustan a ninguna traza de falla, pero que si observamos en un corte correctamente orientado podremos asignar a un único plano. En el caso de fallas de buzamientos altos, como son los desgarres, los epicentros aparecerán perfectamente alineados según la traza de la falla. Esto lo podremos comprobar de forma práctica si dibujamos sobre una hoja de papel unos puntos de forma aleatoria, asumiendo que el papel es un plano de falla y los puntos hipocentros de terremotos, si ponemos el plano vertical todos los hipocentros se proyectarán en la horizontal sobre la traza de plano de falla y si disminuimos la inclinación de la hoja veremos en planta una nube de puntos sin que se observen alineaciones.

Pero, ¿cómo podemos saber si la falla se ha movido generando terremotos?, para este paso de la investigación surge la paleosismología, encargada de estudio de los terremotos antes de las primeras crónicas históricas. Generalmente, debido a la juventud de los escarpes de origen sísmico acaecidos durante el Holoceno, la erosión aún no ha podido generar afloramientos donde se puedan observar con claridad las fallas, por lo que tendremos que recurrir a técnicas de trinchera artificial que seccionen el plano de falla a estudiar (Fig. 1).

La elección de la posición de la trinchera es uno de los puntos más delicados e importantes de la investigación. Para este objetivo nos podremos ayudar de la microtopografía y de la geofísica, como perfiles gravimétricos, tomografía eléctrica o de georadar, para confirmar

en la medida de lo posible, que el lugar seleccionado para realizar la trinchera es el adecuado. Una vez realizada la trinchera y cortada la falla, pasaremos a estudiar los diferentes saltos de falla que se hayan producido, mediante el estudio estratigráfico de las cuñas detríticas asociadas a cada salto de falla. Si podemos ver la estría de la falla y calcular el salto real para cada evento y conocemos la longitud de la ruptura, se podrán calcular las energías necesarias para mover la falla en cada terremoto. El siguiente paso es realizar la geocronología de cada uno de los terremotos, utilizando la técnica más adecuada en relación a los materiales que estemos cortando. Otra forma de identificar terremotos es la localización de sismitas (estructuras de deformación de origen sísmico en sedimentos recientes), siendo los lagos uno de los medios sedimentarios mejores para su registro.

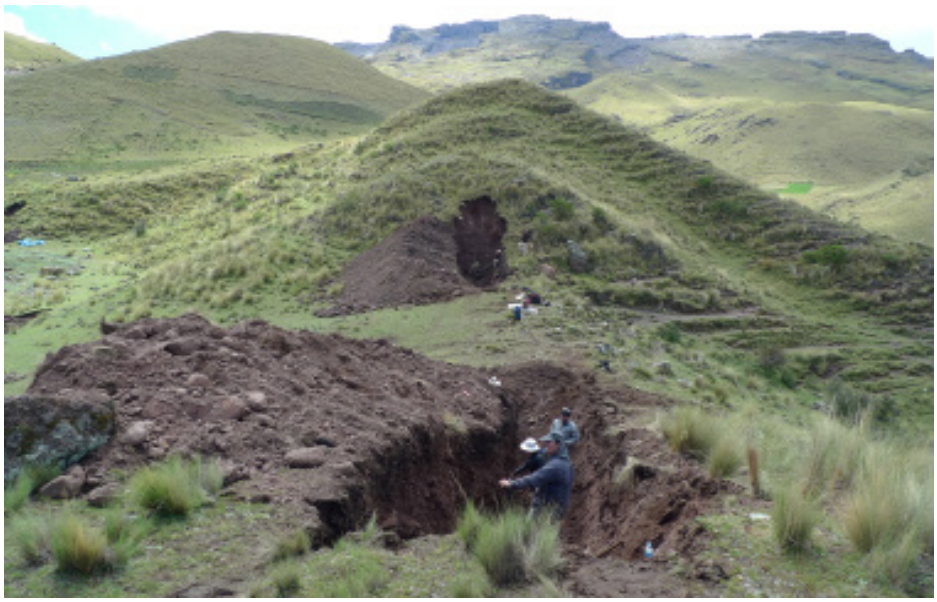

Fig. 1. Trincheras paleosismológicas realizadas en la falla activa de Pachatusan (Cuzco, Perú).

En 1954, Gutenberg y Richter ya advierten que en la mayoría de los países los registros sísmicos usuales abarcan solamente unos pocos siglos y que muchas zonas con fallas activas no han registrado terremotos importantes. Este es el claro aporte de la geología y, en este caso de la paleosismología, proporcionar datos en abanicos temporales amplios y la determinación de las principales fuentes sismogenéticas, que son esenciales para la elaboración de mapas de riesgo sísmico. En los últimos años, la Arqueosismología ha progresado notablemente aportando importantes datos sísmicos en zonas donde no había registro ni geológico ni histórico. En esta disciplina se requiere la colaboración directa entre geólogos, arqueólogos, historiadores y arquitectos, ya que estudia estructuras de

deformación sísmica en yacimientos arqueológicos y edificios patrimoniales. A pesar de que la Arqueosismología abarca todo el periodo durante el cual la humanidad ha dejado restos que han perdurado en los sedimentos y rocas que han podido verse afectados por terremotos, esta disciplina cobra especial importancia con la aparición de las primeras construcciones humanas. Por ejemplo, un periodo muy interesante es el romano, con importantes obras e infraestructuras públicas que han perdurado hasta nuestros días y que, sin embargo, es muy desconocido a nivel sísmico en España. Valga como ejemplo el recientemente descubierto terremoto de Complutum (actual Alcalá de Henares, Madrid) que destruyó esta ciudad romana en la segunda mitad del s. IV y que no ha quedado registrado en ninguna crónica (Fig. 2). Gracias a técnicas arqueosismológicas, ha podido cuantificarse la magnitud de este terremoto, que fue en un intervalo de entre 5,5 y 6,6.

Fig. 2. Cisterna romana realizada con mortero hidráulico fracturada por diques de arena procedentes de la licuefacción sísmica del sustrato infrayacente a esta construcción. Terremoto de Complutum s. IV AD. Yacimiento romano de La Magdalena (Alcalá de Henares).

El trabajo del geólogo también está relacionado con la prevención, en este caso con el diseño de escenarios sísmicos, donde se puedan prever la ocurrencia de determinados efectos ambientales como licuefacciones, deslizamientos, grietas en el sustrato, etc. Todos los efectos ambientales de terremotos quedan registrados en la escala macrosísmica ESI07. Esta escala de intensidades se basa en la clasificación de los efectos causados por los terremotos sobre las personas, construcciones humanas (edificaciones e infraestructuras) y en el medio natural (efectos ambientales o geológicos). Este parámetro de tamaño sísmico proporciona una estimación de la severidad de la sacudida sísmica teniendo en cuenta los efectos producidos por el rango completo de frecuencias del movimiento

ondulatorio así como de las deformaciones estáticas que se produzcan. La importancia de esta escala radica en que no es necesario tener poblaciones para registrar intensidades, como ocurre con las escalas clásicas, sino que los efectos se reparten por todo el territorio, incluidas las poblaciones. Gracias a esto se pueden localizar con mayor precisión la localización epicentral de terremotos históricos, por ejemplo.

Riesgo volcánico

Uno de los riesgos naturales con mayor impacto social es el volcánico, pues aunque es el menos frecuente de todos, es potencialmente el más dañino, y una pequeña erupción puede producir efectos globales como ocurrió con la erupción del volcán Eyjafjallajökull en Islandia en 2011 que paralizó el tráfico aéreo en buena parte del globo terrestre durante varios días con unas considerables pérdidas económicas a nivel mundial. Las mayores pérdidas se producen normalmente en los bienes (tierras, cosechas, ganado, infraestructuras) y trastornos en las comunicaciones y transporte, más que en vidas humanas pues, a diferencia de otros procesos geológicos, las erupciones volcánicas sí pueden predecirse, y si se hace con la suficiente antelación, es posible evacuar a la población y evitar irreparables pérdidas de vidas humanas.

El riesgo volcánico en España queda circunscrito a las islas Canarias, pues todas ellas salvo La Gomera son islas volcánicas activas (se considera activo aquel que ha tenido erupciones volcánicas durante el Holoceno -11700 años-). En las islas Canarias se han producido 17 erupciones históricas (el periodo histórico abarca desde la conquista alrededor de 1400): 7 en La Palma, 2 en El Hierro, 6 en Tenerife y 2 en Lanzarote, donde han tenido lugar los procesos eruptivos de mayor envergadura y magnitud de los ocurridos en las islas en período histórico, teniendo en cuenta el número total de días con erupción, así como la superficie cubierta por materiales volcánicos. También se encuentra en las islas el estratovolcán Teide, el tercer volcán más alto de la Tierra considerado desde el fondo marino.

El estudio de los riesgos volcánicos ha experimentado un fuerte desarrollo y evolución en los últimos años, de forma paralela al avance en los conocimientos de volcanología y a la aparición y desarrollo de nuevas técnicas de monitorización volcánica, que ahora son capaces de proporcionar multitud de datos en tiempo real que pueden servir para mejorar el pronóstico de la erupción a corto plazo y en la mejora del proceso de construcción del árbol de eventos para la evaluación del riesgo. El avance en el estudio del riesgo volcánico en los últimos años no hubiera sido posible sin el desarrollo de las herramientas de los Sistemas de Información Geográfica, que permiten la integración de todos los datos en un único sistema, y el análisis integrado de todos ellos en un plazo de tiempo mínimo, con la consiguiente mejora de las predicciones a medio y corto plazo de las erupciones volcánicas.

Cuando hablamos de riesgo volcánico nos referimos a la expectativa de pérdida debido al impacto de un evento volcánico peligroso, es decir, el riesgo estará en función del valor de los elementos expuestos a un peligro volcánico concreto. La peligrosidad volcánica se refiere al fenómeno geológico y podemos definirla como la probabilidad de ocurrencia de un evento volcánico dañino en un periodo de tiempo determinado y en un espacio concreto. La probabilidad espacial de la apertura de un nuevo centro emisor se conoce como susceptibilidad volcánica que, junto a los estudios de los períodos de recurrencia de dichos eventos, da como resultado una estimación de la peligrosidad volcánica. Es en estos campos donde la aportación de la geología es fundamental con el estudio y conocimiento de los procesos y productos volcánicos, mientras que en la estimación del riesgo intervienen otros expertos no relacionados con la ciencia, como gestores, políticos, etc.

Al estudiar el riesgo volcánico, entendiendo que hablamos de la peligrosidad, hemos de tener en cuenta en primer lugar el tipo de volcán de que hablamos, si es un volcán poligenético que da como resultado un estratovolcán complejo, o un volcán monogenético que se forma en una única erupción, si es una erupción efusiva con emisión de coladas o domos, o si es explosiva, con emisión de nubes de ceniza de proyección de bombas y escorias, caída de piroclastos, si hay emisión de coladas piroclásticas o si se puede producir una inyección de aerosoles en la atmósfera. Hay que tener en cuenta además los riesgos asociados al proceso eruptivo que no son propiamente volcánicos, como la sismidad (ondas de choque, terremotos y temblores volcánicos), deformaciones del terreno, los deslizamientos o los lahares que pueden producirse independientemente de que al final haya o no erupción, o los incendios. Por todo ello, el riesgo volcánico es uno de los más complejos de evaluar y estudiar. A ello hay que añadir que es un proceso que puede durar días, meses o incluso años y que finalmente puede o no haber una erupción, a diferencia de los terremotos, inundaciones o deslizamientos que pueden considerarse eventos puntuales en el tiempo.

Para una adecuada evaluación de la peligrosidad volcánica, el geólogo debe conocer en primer lugar la historia eruptiva del volcán mediante el estudio de sus depósitos: estratigrafía de los materiales, espesor y alcance de las coladas y distribución de materiales piroclásticos. Debe realizar muestreos de los materiales para su caracterización y análisis posterior en el laboratorio (Fig.3), donde se estudiará su composición, sus características petrológicas, y hay que tomar muestras para intentar datarlas, etc. A su vez, estos datos se utilizarán de parámetros de entrada en los modelos físicos y numéricos necesarios para la estimación de la peligrosidad volcánica cuantitativa, como un proceso dinámico que pueda ser utilizado en momentos de crisis volcánicas. Del estudio de los materiales y productos de las erupciones pasadas podremos obtener datos sobre su magnitud y explosividad, características fundamentales para la estimación de la peligrosidad volcánica.

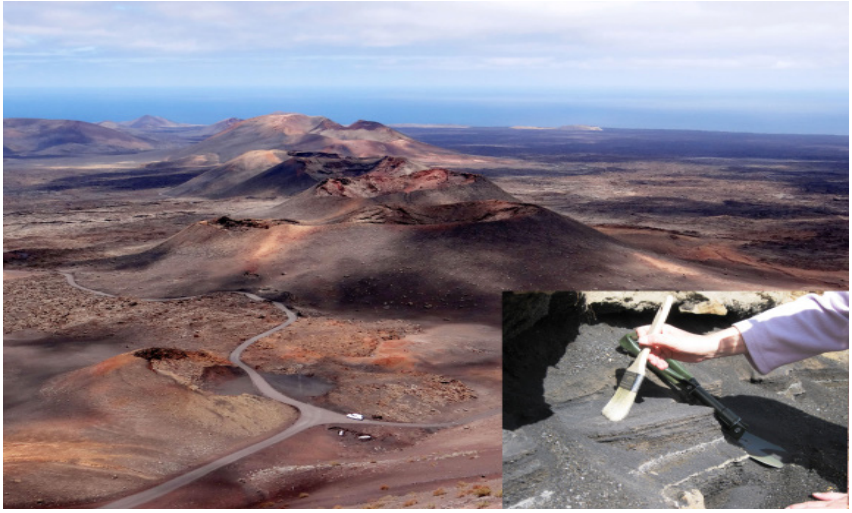

Fig. 3. Fisura principal de la erupción de Timanfaya 1730-36 (Lanzarote). La fotografía de detalle es un muestreo de piroclastos de la erupción de Timanfaya, Lanzarote (Islas Canarias).

Los estudios petrológicos y geoquímicos arrojarán luz sobre la dinámica de la erupción y, en combinación con los anteriormente citados, de la extensión de la misma. De las dataciones podremos obtener los periodos de recurrencia para los distintos tipos de eventos volcánicos considerados. La cartografía de los centros de emisión, fisuras eruptivas, fallas y diques y sus orientaciones nos dará una información fundamental sobre el campo de esfuerzos de una zona concreta y sus características estructurales, dando así información sobre los lugares más susceptibles de albergar un nuevo centro eruptivo.

Todos estos datos geológicos son los que se utilizarán como punto de partida para la elaboración de los mapas de susceptibilidad y peligrosidad volcánica, a los que si añadimos la vulnerabilidad de los elementos expuestos nos darán información sobre el riesgo volcánico de un área concreta. Sin estos datos, cualquier estimación del peligro volcánico no tendrá ninguna aplicabilidad real, pues carecerá de lo fundamental, que es la experiencia y el conocimiento de las erupciones pasadas.

Las erupciones volcánicas presentan la ventaja frente a otros procesos naturales potencialmente peligrosos de que “nos avisan”, emiten señales de que algo está cambiando en el sistema. Podremos detectar estas señales, si hay un sistema de vigilancia adecuado, si ese sistema registra lo que el volcán está diciendo, y si podemos interpretar correctamente esos datos. Esta situación no siempre es así, en algunas ocasiones porque no hay nadie escuchando, es decir, no sabíamos que había un volcán que podía entrar en erupción y no se estaba vigilando, o porque no podemos registrar los cambios que se producen.

Para mejorar esa situación, y más cuando hablamos de zonas intensamente pobladas, una de las aportaciones más importantes del trabajo del geólogo será desentrañar la historia eruptiva previa para conocer los eventos pasados y saber qué podemos esperar del futuro, calcular los periodos de recurrencia para la peligrosidad y aportar los datos que serán la base de los modelos físicos y matemáticos para la elaboración de modelos y mapas de peligrosidad y que permitan un buen diseño del sistema de vigilancia.

Riesgo por deslizamiento y colapso

Son los procesos gravitacionales los principales responsables de deslizamientos y colapsos, pudiendo causar daños económicos y sociales importantes, al afectar tanto a poblaciones como grandes infraestructuras. Un caso extremo de esta situación son los deslizamientos que se pueden producir en embalses, los cuales podrían generar problemas importantes por desbordamiento o la rotura directa de la cerrada de la presa.

Los deslizamientos son conocidos en sentido genérico como movimientos de ladera y están influenciados tanto por procesos geológicos, como climáticos, sin olvidar parámetros ambientales como la deforestación. Las laderas de los relieves que vemos en superficie tienden a un equilibrio en las condiciones actuales y es al variar alguna de estas condiciones cuando se pueden generar los deslizamientos, que pueden ser de muy diferente naturaleza: deslizamientos rotacionales y traslacionales, flujos, desprendimientos, vuelcos, avalanchas, desplazamientos laterales, etc., condicionando sus características en función del tipo de sustrato deslizado (rocas, suelos, derrubios, etc.). La labor del geólogo en este tipo de riesgos va a estar encaminada a evaluar la peligrosidad de ocurrencia en el caso de que varíen algunas de las condiciones ambientales, como es el movimiento de materiales por una gran obra, para lo cual utilizará la mecánica de rocas y la ingeniería geológica. Estas técnicas están íntimamente ligadas en el caso de los deslizamientos y aportarán predicción y soluciones a la interacción con la actividad humana que genera las situaciones de riesgo.

El trabajo de campo estará precedido de la revisión de la cartografía geológica existente y de fotointerpretación y teledetección. La geomorfología es otra herramienta básica en la identificación de deslizamientos o zonas susceptibles de serlo, por lo que el uso de mapas geomorfológicos va a aportar una información básica en este tipo de riesgos. Esto focalizará la búsqueda de afloramientos susceptibles de producir daño. El reconocimiento sobre el terreno de zonas inestables servirá para la toma de datos in situ (como fracturación), aplicar técnicas de geofísica, ensayos de campo y toma de muestras, y si es necesario se realizarán sondeos. Una parte importante del estudio son los ensayos geotécnicos de laboratorio que aportarán datos geomecánicos de los materiales estudiados y que servirán para el cálculo de estabilidad. Otra técnica empleada

es la monitorización mediante instrumentación de laderas, con el uso de inclinómetros, extensiómetros, tiltímetros y piezómetros, que dan una información a tiempo real de la evolución del deslizamiento o potencial deslizamiento. Con todos estos datos se elaboran modelos y mecanismos de rotura, que se podrán utilizar para tomar medidas correctoras.

Los factores que más van a influir en este tipo de riesgos, y que tiene que aportar el trabajo del geólogo, son los siguientes: litologías y grado de alteración, estructura, comportamiento geomecánico, propiedades físicas y resistentes de las rocas y parámetros hidrogeológicos. Nuevamente es necesario un trabajo multidisciplinar, ya que, por ejemplo, fuertes precipitaciones pueden generar importantes deslizamientos, por lo que la interacción con la meteorología es clara. Otro mecanismo disparador de deslizamientos son los terremotos, teniendo en España buenos ejemplos asociados a terremotos históricos importantes (Fig. 4).

Fig. 4. Desprendimientos en el Tolmo de Minateda (Albacete, España), asociados al terremoto de Lisboa de 1º de noviembre de 1755. Nótense las tumbas antropomórficas (visigodas) cuya posición original era la zona alta del Tolmo. Calizas bioclásticas marinas del Mioceno medio.

Riesgo de inundaciones

El riesgo geológico cuya consumación tiene mayor incidencia en nuestro país es el de las inundaciones asociadas a las avenidas y crecidas fluviales, generando pérdidas que se aproximan a los 750 millones de euros al año (desde el año 1987); se estima que aumenten a los 857 millones anuales hasta el 2033; y una pérdida de vidas humanas que supera las 350 víctimas mortales en las dos últimas décadas en España.

El papel del geólogo en el análisis y prevención del riesgo por inundaciones debería ser fundamental en cualquiera de los métodos de análisis de la peligrosidad habitualmente empleados: hidrológico-hidráulicos, histórico-documentales, geológico-geomorfológicos, y botánicos (Díez-Herrero *et al*., 2008); si bien, como es lógico, su papel es más relevante en el empleo y desarrollo de los métodos geológico-geomorfológicos.

Comenzando por los métodos hidrológicos de estimación de caudales de avenida, el papel del geólogo no debe limitarse en un mero imitador o aprendiz de las técnicas hidrológicas habituales del ámbito de la ingeniería civil (análisis estadístico de caudales y modelación precipitación-escorrentía), sino que puede aportar nuevas visiones para mejorar los estudios como: consideración del papel de la constitución litológica y la estructura geológica en las abstracciones iniciales del proceso de transformación lluvia-aportación (número de curva); incidencia de parámetros geomorfológicos (índice de bifurcación, densidad de drenaje, sinuosidad de cauces...) en la génesis y propagación de la onda de avenida (hidrograma unitario geomorfológico, onda cinemática geomorfológica). Especial utilidad tiene la información geológica en la mejora del análisis estadístico de caudales de avenida, puesto que las series de datos instrumentales (caudales máximos registrados en las estaciones de aforo) suelen ser cortas (rara vez superan la treintena de datos anuales), muy localizadas y por lo tanto poco representativas espacialmente de las zonas problemáticas y estadísticamente (rara vez registran extremos). De ahí que los datos del registro paleohidrológico de inundaciones (depósitos, dendroevidencias y liquenometría; Benito y Díez-Herrero, 2015) sea de utilidad para completar o a sustituir los datos sistemáticos (ampliando el registro temporal en varios siglos y milenios) (Fig. 5), mejorando los ajustes de las partes altas de la función de distribución de frecuencias (baja frecuencia, alta magnitud), donde mayor incertidumbre existe. La formación geológica en sedimentología fluvial, petrología exógena, geomorfología y geocronología resulta imprescindible e irremplazable para la reconstrucción de las paleoinundaciones y su incorporación al análisis estadístico de caudales.

En los métodos hidráulicos de simulación de la circulación del agua de avenida por la superficie terrestre, el geólogo puede aportar la visión hidrodinámica y evolutiva de los cauces y sus márgenes. De esta forma, los estudios deberían incorporar la importancia de las acciones elementales de erosión, transporte y sedimentación en la movilidad del lecho en los modelos numéricos; especialmente de la importancia del volumen y tipología de materiales transportados (como carga de fondo, suspensión y flotación) en las características reológicas del flujo y la peligrosidad asociada. Pero sobre todo, la geología puede aportar una visión evolutiva que permita conocer tendencias de migración de los elementos del cauce y la posibilidad de que se produzcan fenómenos de avulsión y captura, que cambian radicalmente la posición del canal activo y zonas peligrosas y en riesgo asociadas.

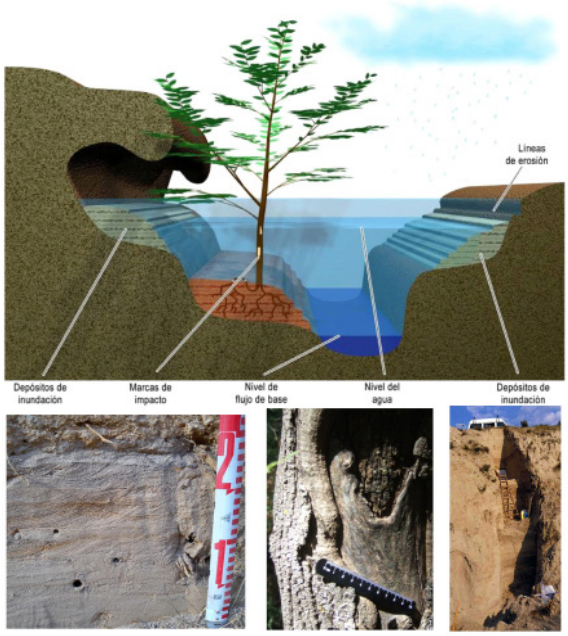

Fig. 5. Esquema que representa las diferentes fuentes de datos en paleohidrología de inundaciones en el trabajo que realiza el geólogo en el campo.

En lo que se refiere a los métodos geológico-geomorfológicos, el empleo de las evidencias empíricas de inundaciones del pasado (depósitos, formas características...), constituye la única prueba objetiva de las zonas que en el pasado se han inundado, cómo ha respondido cada sector del territorio, y qué efectos ha tenido en los elementos expuestos y vulnerables. Por ello, la participación del geólogo es fundamental aportando evidencias objetivas, frente a las hipotéticas avenidas de diseño para altos periodos de retorno, que no dejan de ser un mero artificio estadístico, sin contrastación física de que se va a desarrollar como predicen los modelos. La realización de detallados mapas del cauce y la llanura de inundación, delimitando elementos geomorfológicos y sus facetas a partir de fotointerpretación estereoscópica multitemporal (referencia del vuelo americano de 1955-56 y actual), es una aportación valiosa de los geólogos al Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, cuya guía metodológica detalla cómo realizar empleando técnicas geomorfológicas (Marquínez *et al*., 2008; Sánchez y Lastra, 2011).

Los campos de aplicación práctica de estas aportaciones del geólogo a los análisis de la peligrosidad y riesgo por inundaciones son muy variados, y van desde el dimensionamiento de los órganos de desagüe de infraestructuras hidráulicas (ya que el reglamento de seguridad de presas de embalse establece en 10.000 años la avenida de diseño; Benito *et al*., 2004); hasta la ordenación territorial y urbanística a diferentes escalas; o la adopción de medidas naturales de retención de agua en el territorio y restauración de riberas;

pasando por el establecimiento de sistemas de aseguramiento e iniciativas de educación en el riesgo; sin olvidar la incorporación de la incidencia del cambio global en los estudios de riesgo, tal y como propugna la Directiva europea de inundaciones.

Con toda esta información sobre peligrosidad, obtenida mediante diferentes técnicas de campo, gabinete e informáticas, e independientemente del tipo de riesgo, se obtendrán los mapas de riesgo al integrar estos valores con la vulnerabilidad y exposición. Todos estos mapas serán utilizados a diferentes niveles, desde ayuntamientos hasta nivel estatal, pasando por comunidades autónomas, pero con un único objetivo, reducir la incidencia de los riesgos geológicos que puedan afectar a la población. Por tanto, el trabajo del geólogo en riesgos es uno de los que mayor repercusión social puede tener y en el que la sociedad puede ser consciente de la importancia de dicha labor.

El trabajo del geólogo durante la emergencia

Según la Organización de Naciones Unidas (ONU) y a partir de los datos disponibles hasta el año 2015, se producen una media de 335 desastres naturales que afectan a todo el mundo cada año, donde la media de personas fallecidas es de 33.000. Entendemos por desastre natural a cualquier catástrofe debida a la dinámica propia de la Tierra y que afecta a los bienes y a las personas con una magnitud enorme. Por consiguiente, estas catástrofes generan enormes pérdidas de vidas humanas, de bienes y que por sí sola puede colapsar la sociedad que la sufre. Dentro de estas catástrofes están los terremotos, las erupciones volcánicas, las inundaciones, deslizamientos del terreno, subsidencias y hundimientos, caídas de rocas, huracanes, tormentas tropicales, tifones, cambios del nivel del mar de tipo súbito, grandes nevadas, y olas de frío y calor, entre las más importantes y de mayor magnitud. Hemos omitido de forma deliberada las epidemias o las catástrofes radiológicas, químicas y biológicas, puesto que vamos a centrarnos en aquellas donde los geólogos tenemos mucho que aportar.

Por ejemplo, cada año el Servicio Geológico Británico estima que en el mundo hay una media de 15 terremotos de magnitud mayor a 7, y que en cada siglo hay 10 terremotos de magnitud superior a 8. Estos terremotos afectan a zonas pobladas con desigual suerte. En función del grado de inclusión de la información sobre los efectos geológicos de los terremotos destructivos en la prevención y gestión de terremotos, el número de víctimas oscilará varios órdenes de magnitud. Además, la existencia de cartografía y bases de datos de fallas activas, la implantación de políticas educativas informando y “formando” sobre “qué hacer” en caso de gran terremoto y la aplicación de códigos constructivos que incluyan información “útil” sobre las aceleraciones que puede alcanzar el terreno, tipo de vibración y dirección de propagación de las ondas destructivas, mitigaran sus efectos sobre las sociedades golpeadas.

En este sentido, ¿qué es la geología de emergencias? La Geología de Emergencias se entiende como la aplicación de los conocimientos geológicos sobre fenómenos naturales asociados a riesgos geológicos y que ayuda en la PREVENCIÓN, GESTIÓN y RECUPERACIÓN, durante una catástrofe por inundación, terremoto, etc. La gran novedad en estos tiempos es que la geología además de la PREVENCIÓN, puede aportar mucho en la GESTIÓN de la emergencia durante las horas "calientes", que son las emergencias durante las horas "calientes", que son las inmediatamente posteriores a la emergencia, como durante el restablecimiento de los servicios esenciales. Como ejemplo, desde el Instituto Geológico y Minero de España, se está implantando la Unidad de Respuesta Geológica de Emergencia (URGE), como un grupo operativo con formación en geología y riesgos naturales, junto con formación en emergencias y protección civil. ¿Qué puede aportar un geólogo de emergencias? La formación del geólogo incluye el estudio de las inundaciones más allá de los registros históricos, permitiendo calcular los caudales máximos durante las inundaciones que ha dejado el registro geológico, así como entendiendo el tipo de respuesta hídrica ante inundaciones, tanto de tipo "lento" como las inundaciones "súbitas". Esta información es crucial para la gestión de emergencias al estimar la zona afectada, zona inundable, zonas de baja velocidad de agua donde acumulará carga transportada, capacidad de arrastre o desplazamiento de grandes cargas, etc. De esta manera, ayuda en la planificación de la emergencia al director operativo de la Emergencia, así como al gestor que ha de tomar decisiones importantes de amplio alcance en poco tiempo.

Aquí es donde el Geólogo de Emergencias tiene un papel protagonista. En general, cuando se produce una gran catástrofe, los países dejan en manos de los servicios de Protección Civil y Unidades Militares (nacionales y extranjeros) la gestión de la emergencia. Sin embargo, en general estos técnicos y gestores desconocen "qué está pasando", y sobre todo "cómo va a evolucionar", al no tener una formación propia en Riesgos Geológicos. En este contexto, lo inteligente es incorporar geólogos con formación en Riesgos Naturales (terremotos, inundaciones, deslizamientos, volcanes, etc.), que además tengan formación en Protección Civil y Emergencias, con experiencia en trabajo conjunto con expertos en la Gestión de Emergencias, personas a cargo de la emergencia y cualquier gestor con competencias en la toma de decisiones.

Dentro de la estructura de la gestión propia de la emergencia, los Geólogos de Emergencias tienen cabida en: (1) el Comité de Coordinación (CECO) junto con los gestores encargados de la emergencia (director operativo, director técnico, representantes políticos, técnicos de emergencias, etc.), asesorando sobre grandes números: área afectada, réplicas de terremotos, zonas inundables, evolución a 24 h y los próximos 7 días del fenómeno natural responsable de la emergencia. (2) Grupos Operativos: como un geólogo forense, registrando datos "in situ" que ayuden a entender como se ha producido el fenómeno catastrófico, alcance del mismo, y como va a seguir evolucionando. No

hay que olvidar que durante el restablecimiento de los servicios esenciales por parte de los servicios de emergencias se elimina información "útil" para que los geólogos dictamen sobre el riesgo sufrido o por sufrir, y ayuden a la toma de decisiones. Son los datos "efímeros" imprescindibles para los Geólogos de Emergencias y que solo pueden ser medidos e interpretados por ellos. (3) Comité de restablecimiento y explicación del fenómeno, para dar toda la información a la comunidad y que ésta se implique en la emergencia sabiendo "lo que está pasando" y que sus decisiones no aumenten el daño. Realizan informes sobre lecciones aprendidas y cómo mitigar el daño la próxima vez que el terremoto o inundación ocurra (Fig. 6). No hay que olvidar que los fenómenos geológicos destructivos son "recurrentes" en el tiempo. Si aumentan las víctimas por catástrofes naturales es debido a que aumenta la exposición de la población, la cual suele olvidar aquellas desgracias que sufrieron sus abuelos, o los abuelos de sus abuelos.

Fig. 6. El trabajo del geólogo durante la emergencia. En la fotografía de la izquierda trabajando integrados dentro del CIDI (Centro de Integración y Difusión de la Inteligencia) de la UME durante un simulacro. En la de la derecha trabajando sobre el terreno durante el terremoto de la Emilia Romagna de 2012.

Finalmente, para abordar con éxito la gestión de estas catástrofes, no solo hay que ser imaginativo, hay que incorporar a los Geólogos de Emergencias, expertos que conocen dónde hay una falla activa, dónde una zona es más probable que se inunde y con qué velocidad y capacidad de carga arrastrará el agua, o si una erupción volcánica será explosiva y devastadora, o tranquila y fotogénica. Pero además, cuando estemos de lleno en una catástrofe natural, también nos dirá cómo evolucionará el fenómeno, por qué se ha producido la magnitud del daño, y qué decisiones ayudarán a reducir esa magnitud, y no a aumentarla. Es aquí donde las instituciones responsables de la formación de los geólogos y las administraciones que las financian, son los responsables de llevar esta profesión a la entidad que le corresponde.

Los conocimientos que aporta

La complejidad de los procesos geológicos hace que la experiencia y la alta cualificación del profesional dedicado a riesgos sea una de las claves para su trabajo. Los fenómenos que son relativamente sencillos desde un punto de vista teórico, cobran una gran complejidad cuando el geólogo se enfrenta al problema sobre el terreno. Esta cuestión hace que en algunos casos se obvien *a priori* procesos potencialmente peligrosos por profesionales ajenos a la Geología o se tomen medidas "sobre el papel" sin realizar los estudios adecuados. En este caso, el trabajo del geólogo es clave a la hora de informar sobre riesgos potenciales y mitigar sus consecuencias, cobrando una dimensión social incuestionable. Los conocimientos que aporta van a tener fundamentalmente tres componentes: teórica, práctica e integradora de procesos; tanto en el registro de nuevos datos de catástrofes, como el tratamiento de información a tiempo real.

El conocimiento del medio geológico será utilizado por el geólogo para planificar el estudio a realizar, diseñar las campañas de campo, toma de muestras, tratamiento de datos, etc. Como consecuencia de esto podrá elaborar presupuestos para evaluar los costes económicos totales de la investigación a realizar. El trabajo de campo se basa fundamentalmente en la experiencia adquirida por el profesional de la geología a lo largo de los años. Esta es una de las fases más importantes de todo el proceso de cálculo de riesgos, puesto que la calidad de los modelos y cartografías finales van a depender de la exactitud y rigurosidad en la toma de datos en campo. Esto irá combinado con estudios de teledetección y cartografía digital que apoyará la campaña de campo y reconducirá el diseño de la toma de datos. El tratamiento de los datos en gabinete es otro de los puntos clave: partiendo de buenos datos de campo, los análisis serán más sencillos y las soluciones arrojarán luz sobre los procesos estudiados.

Como ya se ha mencionado anteriormente, una de las claves para el conocimiento en profundidad de las catástrofes naturales, es aumentar el registro de datos en intervalos temporales mucho mayores que los existentes en la actualidad. Es decir, que la clave del futuro está en el pasado geológico. Por ejemplo, un volcanólogo aportará datos de los diferentes tipos de erupciones que ha podido tener un determinado volcán a lo largo de su historia geológica, lo que redundará en que las medidas de seguridad estarán condicionadas por estos datos. Ese mismo volcanólogo, integrado en un equipo multidisciplinar de geofísicos y geoquímicos, será capaz de interpretar en tiempo real la información que pueda llegar de la monitorización de un volcán activo y realizar una predicción a corto plazo de la evolución de la erupción.

Por tanto, la labor del geólogo en riesgos debe integrarse en un equipo multidisciplinar

de expertos, que en su conjunto serán los encargados de realizar la evaluación del peligro en cuestión. Y aportará conocimientos sobre el medio geológico, dinámica de procesos, integración y tratamiento de datos e interpretación genética de procesos, entre otros.

Herramientas que utiliza

Las herramientas que maneja un geólogo en riesgos no son muy diferentes de las que se utilizan en otras áreas de conocimiento de la Geología, puesto que, dependiendo del problema al que se enfrente, estas podrán ir desde técnicas estratigráficas hasta sistemas de información geográficos (SIG), pasando por la geocronología. Lo que va a variar fundamentalmente es la forma de utilizarlas y la interrelación entre ellas.

Como ya se ha citado con anterioridad, una de las claves del estudio de riesgos naturales es el trabajo de campo, para el cual siempre son imprescindibles las clásicas herramientas de: brújula, martillo, lupa, mapas topográficos y geológicos, estereoscopio de campo, fotografía aérea, etc. En la actualidad el geólogo ya incorpora útiles herramientas de última generación como receptores portátiles de GPS, para cartografía digital sobre el terreno o directamente sobre *tablet*-PC. Esta última herramienta va a permitir utilizar de forma directa un ordenador en el campo, pasando datos a tiempo real con la posibilidad de emitirlos vía satélite a una central de datos gestionada por un SIG, lo cual puede ser de vital importancia en el estudio de riesgos como el volcánico o el trabajo durante la emergencia. Actualmente los drones también son una importante herramienta de trabajo en el campo y que es aplicable durante el trabajo en la emergencia.

La estratigrafía es una de las áreas de conocimiento que más datos puede aportar a riesgos, puesto que abre el abanico temporal a miles o millones de años, siendo parte fundamental en lo que se ha venido a conocer como la geología del Cuaternario. En este caso se ocupa del registro geológico (sedimentos) de eventos catastróficos, teniendo la difícil tarea de discriminar otros posibles orígenes que no sea del riesgo en cuestión y de la geocronología de los mismos. La estratigrafía se va a centrar especialmente en sedimentos continentales, que generalmente están mejor expuestos que los marinos, aunque estos últimos se están mostrando como una importante fuente de datos cuaternarios en la actualidad. Esto es posible gracias al avance en las técnicas de la toma de datos desde buques oceanográficos. Son pues los datos procedentes de ambientes sedimentarios fluviales y lacustres los que mayor información van a aportar en riesgos, salvo para el riesgo volcánico, como es el caso del papel de los depósitos de inundación de baja energía (*slackwater sediments*) en inundaciones o las sismitas (estructuras de deformación de origen sísmico en sedimentos recientes) en el caso de la paleosismología.

La geomorfología es una de las herramientas básicas en cartografía de procesos activos.

Los cambios de la morfología de la superficie del terreno en tiempos recientes van a estar siempre asociados a procesos activos, por lo que es clave a la hora de identificar zonas afectadas por estos fenómenos. Por tanto, nos va a servir como un identificador previo de fenómenos catastróficos, como podrían ser abanicos aluviales o conos de deyección, facetas triangulares en fallas activas, lóbulos de derrame en inundaciones, deslizamientos, etc.

El *software* que se puede utilizar en el tratamiento de datos en bruto puede ser específico de cada área de riesgos, pero todos los datos siempre estarán gestionados y centralizados en un SIG. La cartografía geológica, entendida como una herramienta para riesgos, se ha de utilizar en formato digital, para poder integrarse como una de las bases del análisis de riesgos, al igual que cartografías temáticas específicas, como la geología estructural.

Una vez obtenidos los resultados del tratamiento de datos, el SIG nos va a permitir realizar una cartografía de riesgos y actualizaciones de forma rápida, que es uno de los objetivos principales. La gestión del territorio que se puede deducir de estos mapas de riesgo también se gestiona mediante SIG.

Una de las herramientas más utilizadas en riesgos es la teledetección, entendida como la técnica que permite obtener imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en satélites, bien sea por la reflexión de la energía solar o por un haz energético artificial, o bien por emisión propia. Es interesante que el propio SIG incluya un módulo de teledetección que permita integrar esta información rápidamente, como podría ser en el caso del vulcanismo o el de las deformaciones corticales superficiales previas a un terremoto en una falla activa. También aportaría una información de gran valor para establecer medidas de actuación en el caso de inundaciones.

Las técnicas geofísicas son una importante fuente de datos en riesgos, especialmente en cuestiones de recopilación de datos sísmicos, prospección del subsuelo, como puede ser en la búsqueda de fallas activas y monitorización de volcanes activos donde constituyen la fuente principal de información una vez se ha desencadenado el proceso. La sísmica de reflexión es utilizada tanto en la superficie emergida como en prospecciones marinas, dando excelentes resultados en la búsqueda de estructuras activas en profundidad. El georadar es muy útil en superficies emergidas, pero en este caso con menor grado de penetración en el subsuelo. La sismología es pieza clave en geología de terremotos y en volcanología. En la primera nos permite conocer el carácter (normal, inverso, en dirección) de la falla que ha generado el sismo, además de su localización hipocentral. En el caso de la volcanología, el estudio del tremor volcánico y de los eventos sismo-volcánicos en general, es una herramienta esencial para evaluar la posibilidad de erupción. Al igual que

la gravimetría y la magnetometría, utilizadas tanto para la localización de fallas, como para la determinación de cambios en el sistema volcánico. En líneas generales no se suele aplicar una única técnica, sino que se utiliza una combinación de estas para contrastar las soluciones obtenidas.

En la actualidad la geodesia aplicada a procesos activos se basa en buena parte en la aplicación de técnicas avanzadas de GPS, que permiten una resolución milimétrica. De hecho, en la actualidad se utilizan para medir velocidades relativas de placas tectónicas o para medir deformaciones durante procesos eruptivos o deformaciones precursoras de eventos sísmicos. Para este tipo de medidas se precisa de una estación fija que reduzca el error de las estaciones móviles empleadas para realizar medidas de forma sistemática en un mallado diseñado con anterioridad. La microtopografía clásica o la generada mediante sistemas LIDAR (*Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*), son herramientas muy utilizadas en riesgos como el volcánico, inundaciones, deslizamientos o terremotos. En esta misma línea también se utilizan las imágenes InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) para interferometría de radar, como es en el caso de los terremotos. Todas estas técnicas, aplicadas de forma continuada, nos van a dar movimientos y velocidades de deformación, que podremos aplicar en la monitorización de diferentes tipos de riesgos.

La ingeniería geológica va a aportar soluciones a problemas constructivos asociados a riesgos desde una perspectiva geológica, como es el caso de deslizamientos relacionados con grandes obras, como autopistas, presas, túneles, cimentaciones, etc. Por tanto, su función irá encaminada a que los factores geológicos desencadenantes de riesgos sean tenidos en cuenta e interpretados adecuadamente y a evitar o minimizar los efectos de los riesgos geológicos. Un ejemplo claro, es la determinación de los parámetros mecánicos de materiales recientes en los estudios de microzonación sísmica.

La geocronología puede considerarse como una de las piezas clave en las herramientas utilizadas en riesgos, puesto que de ella depende el correcto cálculo de periodos de recurrencia y retorno, a partir de los cuales calcularemos la peligrosidad. Por tanto, necesitaremos dataciones absolutas para este fin. En algunos casos se pueden obtener dataciones mediante crónicas históricas, pero el periodo que abarca ya sabemos que no es fiable en España más allá del año 1500. Otras dataciones absolutas son la dendrocronología, que estudia los anillos de crecimiento en árboles, o el carácter anual de la sedimentación varvada en lagos (cada par de láminas indica un año de sedimentación). Otra técnica es la liquenometría, basada en la velocidad de crecimiento y colonización de diferentes especies de líquenes en una superficie expuesta. Pero, no siempre es posible llevar a cabo estas dataciones, por lo que lo más común es tener que recurrir a dataciones absolutas,

como son las radiométricas; algunas de las más utilizadas son:

- Radiocarbono (C^{14})
- Series de uranio (U)
- Potasio - Argón (K-Ar)
- Argón – Argón (Ar-Ar)
- Huellas de fisión en apatitos (*fission-track*)
- Cosmogénicos

Otras técnicas absolutas no radiométricas son la luminiscencia (TL u OSL) y los cosmogénicos. La termoluminiscencia es ampliamente utilizada para sedimentos fluviales y se basa en la propiedad que tienen algunos minerales (como el cuarzo, feldespatos o calcita) de emitir luz después de ser calentados y haber sido expuestos a radiación natural. Un grano de cuarzo que sea enterrado en un sedimento, deja de ser expuesto a una fuente de radiación primaria (el Sol) y empieza a recibir radiación natural del medio y la acumulará de manera proporcional al tiempo de enterramiento. Por este motivo, al calentarlo emitirá una cantidad de luz equivalente al tiempo que lleva enterrado y nos dará la edad del sedimento. Esta técnica es muy utilizada en cerámicas, puesto que al cocerse la pieza, su "reloj" se pone a cero y al enterrarse es cuando comienza a recibir la radiación, en este caso no nos daría la edad de cuando se hizo la pieza, sino de cuando fue enterrada. Otras dos variantes de esta técnica son la luminiscencia estimulada ópticamente (OSL) o por infrarrojos (IRSL). Estas dataciones son una buena alternativa en el caso de que haya escasez de materia orgánica, como suele ocurrir en zonas áridas y semiáridas.

Por tanto, la geocronología será una de las áreas más importantes a desarrollar en el trabajo del geólogo en riesgos, ya que condicionan el dato más importante, el periodo de recurrencia y retorno y, de forma indirecta, la peligrosidad. Será pues necesario combinar correctamente las diferentes técnicas aplicadas junto con la meticulosidad en la toma de muestras.

Con qué profesionales se relaciona

La principal característica que representa el trabajo del geólogo en riesgos geológicos es la multidisciplinaridad, tanto dentro de las diferentes áreas de conocimiento pertenecientes a la Geología como con áreas afines. Si tenemos en cuenta lo citado en apartados anteriores, el geólogo va a interactuar con un amplio espectro de profesionales de las Ciencias de la Tierra, ingeniería, geofísica y geodesia. De este modo, el geólogo tendrá que trabajar con geofísicos en cuestiones de riesgos volcánicos, sísmicos y deslizamientos. Con meteorólogos en inundaciones y erupciones volcánicas, ya que estos aportarán datos valiosísimos relacionados con precipitaciones y vientos, tanto a nivel de registro como

desde una perspectiva predictiva. Para ampliar el catálogo de datos al máximo también colaborará con historiadores y arqueólogos. En la mitigación de riesgos trabajará junto con ingenieros y arquitectos en el diseño de estructuras que sean resistentes a los riesgos en cuestión o para ubicarlas en lugares alejados de la zona de influencia de dichos riesgos. Los topógrafos aportarán mapas de detalle de las zonas a estudiar. Quizás la relación más alejada del mundo técnico y científico es la que existe con la clase política, que estará enfocada tanto a la toma de decisiones como al desarrollo de legislación relacionada con la mitigación de riesgos.

¿Quiénes son sus principales clientes?

El diferente alcance de los riesgos geológicos va a condicionar el tipo de clientes que pueden hacer uso de este tipo de estudios, que podrían ir desde un particular hasta administraciones públicas o confederaciones internacionales de países que se viesen afectados por un mismo riesgo. El avance en la legislación ambiental, cada vez más restrictiva en relación a los riesgos naturales, hace que se haya abierto considerablemente el abanico de clientes con los que cuenta el geólogo de riesgos. Así, la pequeña y mediana empresa, dedicada a estudios geológicos y geotécnicos demanda este tipo de estudios que irán encaminados a riesgos que puedan afectar a obras públicas o planificación urbanística. Del mismo modo las grandes multinacionales del sector requieren asesoramiento en riesgos e incluso generan sus propios departamentos de I+D+i en los que se tratan los riesgos naturales. Las aseguradoras basan sus cuotas en los trabajos realizados por los geólogos en temas como riesgo sísmico, volcánico o deslizamientos, por ejemplo. A nivel administrativo el trabajo en riesgos es demandado desde ayuntamientos, Diputaciones Provinciales, Comunidades Autónomas y el Estado, teniendo en este caso una importante dimensión social y de avance en el conocimiento de riesgos, característica de sociedades avanzadas.

Referencias bibliográficas

Astiz, M.yy García, A. (2000). Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica. Ed. Excmo. Cabildo de Lanzarote. Madrid. 458 pp.

Ayala-Carcedo, F.J. y Olcina Cantos, J. (2002). Riesgos Naturales. Ed. Ariel Ciencia. Barcelona. 1.304 pp.

Benito, G. y Díez-Herrero, A. (2015). Palaeoflood Hydrology: Reconstructing Rare Events and Extreme Flood Discharges. En: Paolo Paron and Giuliano Di Baldassarre (Eds.),

Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters. Hazards and Disasters Series (John F. Shroder, Series Editor), Chapter 3, 65-104, Elsevier, Amsterdam (Netherlands).

Benito, G., Rico, M., Díez Herrero, A., Sánchez-Moya, Y., Sopeña, A. y Thorndycraft, V. (2004). Hidrología de paleocrecidas aplicada al cálculo de la Avenida de Diseño y Avenida Máxima de presas. VI Congreso Geológico de España, Zaragoza 12-15 de julio de 2004. Sociedad Geológica de España.

Chuvieco, E. (2002). Teledetección Ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio. Ed. Ariel Ciencia. Barcelona. 586 pp.

Díez-Herrero, A., Lain-Huerta, L. y Llorente-Isidro, M. (2008). Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia nº 1, Madrid, 190 pp.

Ferrer, M., González de Vallejo, L. I., García López-Davalillo, J.C. y Rodríguez Franco, J.A. (2004). Pérdidas por terremotos e inundaciones en España durante el periodo 1987-2001 y su estimación para los próximos 30 años (2004-2033). Ed. Consorcio de Compensación de Seguros. Madrid. 98 pp.

Francis, P. y Oppenheimer, C. (2003). Volcanoes. 2nd. Edition. Oxford University Press. New York. 443 pp.

Giner-Robles, J.L., Silva Barroso, P.G., Pérez-López, R., Rodríguez-Pascua, M.A., Bardají Azcárate, T., Garduño-Monroy, V.H. y Lario Gómez, J. (2011). Evaluación del daño sísmico en edificios históricos y yacimientos arqueológicos. Aplicación al estudio del riesgo sísmico. Proyecto EDASI. Serie Investigación. Fundación MAPFRE, 96 pp.

Goldberg, P. and McPhile, R.I. (2006). Practical and Theoretical Geoachaeology. John Willey & Sons Ltd, UK. 443 pp.

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Otero, C. (2002). Ingeniería Geológica. Prentice Hall. Madrid. 715 pp.

Gutenberg, B. y Richter, C.F. (1954). Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. 2nd, ed. Princeton Univ. Press. Princeton N.J. 310 pp.

IAEA. 2015. The Contribution of Paleoseismology to Seismic Hazard Assesment in

Site Evaluation for Nuclear Installations. IAEA-TECDOC, 1767, 193 pp.

Lario, J. y Bardají, T. (2016). Introducción a los riesgos geológicos. Ed. UNED. 313 pp.

Marquínez, J., Díez-Herrero, A., Fernández, E., Lastra, J. y Llorente, M. (2008). Aspectos geomorfológicos en la modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico y el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. En: Benavente, J. y Gracia, F.J. (Eds.), Trabajos de Geomorfología en España, 2006-2008, X Reunión Nacional de Geomorfología, SEG y Universidad de Cádiz, Cádiz, 377-380.

Martí , J. y Araña, V. (1993). La volcanología actual. Col. Nuevas Tendencias, CSIC, 578 pp.

Martí, J. y Ernst, G.J. (2005). Volcanism and the Environment. Cambridge University Press, 471 pp.

McCalpin, J.P. (2009). Paleoseismology. 2nd Edition. Academic Press, San Diego. 613 pp.

Michetti A.M., Esposito E., Guerrieri L., Porfido S., Serva L., Tatevossian R., Vittori E., Audemard F., Azuma T., Clague J., Comerci V., Gurpinar A., Mc Calpin J., Mohammadioun B., Morner N.A., Ota Y. y Roghozin E. (2007). Intensity Scale ESI, In: Memorie Descrittive Carta Geologica d'Italia (Guerrieri L. and Vittori E. eds.), Servizio Geologico d'Italia – Dipartimento Difesa del Suolo, APAT, Roma, 74, 1-53.

Olcina Cantos, J. y Díez-Herrero, A. (2016). Cartografía de inundaciones en España. Estudios Geográficos, Vol. LXXVIII, 282, pp. 283-315.

Ortiz, R. (1996). Riesgo Volcánico. Ed. Excmo. Cabildo de Lanzarote. Lanzarote. 304 pp.

Rodríguez Pascua, M.A. (1997). Estudio de la Paleosismicidad en Relación con el Cálculo de la Peligrosidad Sísmica en Emplazamientos de Instalaciones Nucleares. Ed. Consejo de Seguridad Nuclear. Madrid. 286 pp.

Sánchez, F.J. y Lastra, J. (Coords.), (2011). Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, 349 pp.

Scarpa, R. y Tilling, R.I. (1996). Monitoring and mitigation of volcano hazards.

Springer-Verlag, Berlín, Heidelberg, 841 pp.

Stiros, S. y Jones, R.E. (1996). Archaeoseismology. Institute of Geology and Mineral Exploration and British School at Athens. Athens. 268 pp.

Suarez, L. y Regueiro, M. (1997). Guía Ciudadana de los Riesgos Geológicos. Ed. ICOG. Madrid. 196 pp.

Walter, M.(2008). Quaternary Dating Methods. John Willey & Sons Ltd, UK. 286 pp.

Yeats, R.S., Sieh, K. y Allen, C.R. (1997). The Geology of Earthquakes. Oxford Univ. Press, New York. 568 pp.

El geólogo en los almacenamientos profundos

Enrique Hernández Parras y Juan Klimowitz Pícola
Geología de Exploración y Síntesis S.L. (GESSAL)

Las características y condiciones geológicas especificas del subsuelo permiten una serie de usos o aplicaciones de los conjuntos rocosos en profundidad, garantizados medioambientalmente, entre los que se encuentra el almacenamiento geológico profundo de materias con carácter recuperable (Gas o aire comprimido-CAES) y los almacenamientos definitivos de residuos industriales, de CO_2 y de residuos radiactivos de alta actividad (RRAA).

El geólogo, ante su compromiso de aplicación de los conocimientos geológicos al bien social, desarrolla una exhaustiva tarea de investigación para la caracterización y modelización geológica 3D de los depósitos geológicos profundos definitivos o los que tendrán una historia de almacenamientos de materias a recuperar mediante ciclos de inyección/extracción.

Las condiciones de presión en el subsuelo profundo permiten que los espacios porosos puedan multiplicar, según la profundidad, por más de 500 veces su capacidad volumétrica con respecto al volumen de los gases a presión atmosférica, con lo cual, una vez identificada una trampa sellada y hermética en profundidad, con dimensiones que pueden ser medidas en km3, permite grandes volúmenes de almacenamiento o depósito, a unas condiciones de seguridad no alcanzables en almacenes someros o de superficie.

Las barreras o sellos constituidos por formaciones geológicas impermeables permiten

el aislamiento de los almacenamientos tipo depósitos definitivos (RRAA, CO_2 , entre otros) como garantía de su desconexión con la Biosfera, Hidrosfera y Atmósfera.

Según la naturaleza de la materia a almacenar se marcan como objetivos litológicos tanto de comportamiento permeable: siliciclásticos, carbonáticos, rocas ígneas fracturadas, etc, como de carácter impermeable: arcillas, sales (en las que se han de generar cavidades por disolución de salmuera) e ígneos no fracturados, entre otras.

Las metodologías para la investigación de los almacenamientos geológicos profundos están basadas en la aplicación de programas exploratorios similares a los aplicados en la investigación geológica de hidrocarburos, entre los que destacan las técnicas de:

- Sísmica de Reflexión (2D o 3D): como sistema geofísico más resolutivo y preciso en profundidad.

- Información de sondeos profundos en los que adquiere una gran relevancia la batería de testificación geofísica (diagrafías), así como posibles análisis y pruebas de producción en ellos realizadas.

Mediante estas técnicas se podrán caracterizar tanto la capacidad de la formación almacén, su geometría o estructura trampa, la formación sellante suprayacente, así como comprobar la garantía de su hermetismo. Con todo ello se podrá proceder al cálculo geométrico, volumétrico y de capacidad de almacenamiento según sus condiciones específicas.

Tipos de almacenamientos

Los almacenamientos profundos se pueden dividir en dos tipos principales de acuerdo a la necesidad o no de ciclos de recuperación de la materia almacenada: almacenamientos recuperables y depósitos definitivos.

- Los almacenamientos de funcionamiento recuperable están destinados a la extracción periódica de los gases inyectados y consisten en los Almacenamientos de Gas Natural y los Almacenamientos CAES de Aire Comprimido.

  - Los Almacenamientos de Gas Natural están destinados a asegurar el balance de presiones para el funcionamiento de los gaseoductos o asegurar reservas estratégicas. Su funcionamiento requiere estar sometidos a ciclos generalmente anuales de inyección (verano) y producción (invierno) de gas, según las necesidades del sistema gasista. Pueden corresponder al aprovechamiento de antiguos yacimientos de gas tras su

depletación o a nuevos almacenamientos en rocas porosas y permeables saturadas en agua salada o en cavidades disueltas en formaciones salinas (Figura 1).

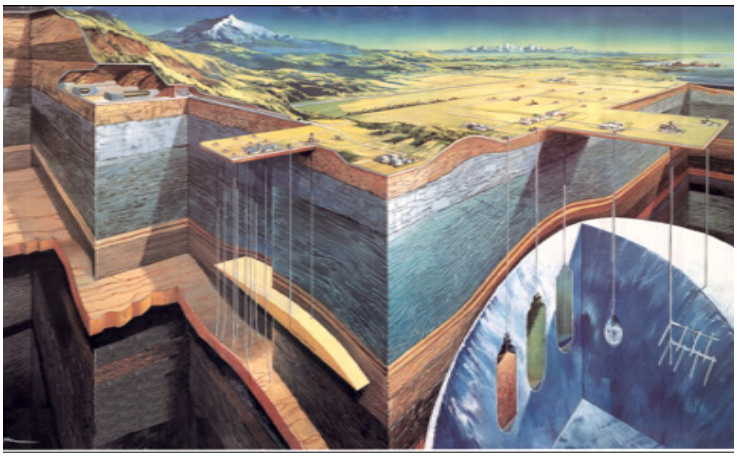

Fig. 1. Distintos tipos de almacenamientos geológicos profundos de gas: Almacén con porosidad por fracturación, Almacén con porosidad intergranular/vacuolar, etc y Almacén en cavidades salinas. Tomada de la Compañía K.B.B.

- Los almacenamientos de aire comprimido (CAES) tienen el objetivo de poder mantener en compresión el aire en profundidad, previamente inyectado, a altas presiones que al ser liberadas puedan suministrar la energía suficiente para la generación eléctrica en momentos de consumos punta o en los que el coste de la generación eléctrica hace rentable el sistema. En este caso no son utilizados almacenamientos depletados, por su mayor coste y volumen y solo son investigados almacenamientos correspondientes a formaciones porosas y permeables con contenido en agua salada o, mayoritariamente, a cavidades disueltas en sales.

- Los depósitos definitivos pueden ser de dos tipos:

  - Almacenamientos de CO_2: son de características similares a los almacenamientos de gas aunque no requieren su recuperación ya que su objetivo precisamente consiste en el aislamiento del CO_2, por lo que una vez producido el llenado del almacenamiento, este queda inhabilitado, proveyendo además futuras reacciones químicas entre el CO_2 y la roca almacén original que hagan imposible su recuperación.

Aunque generalmente, estos almacenamientos-depósitos no utilizan antiguos yacimientos depletados, ya que estos son aprovechados prioritariamente como almacenamientos de gas, existen casos de proyectos en que si se produce esta reutilización como es el caso del yacimiento agotado de petróleo de Hontomín (Ciuden) en España, y el

depletado de petróleo/gas de Lacq en Francia.

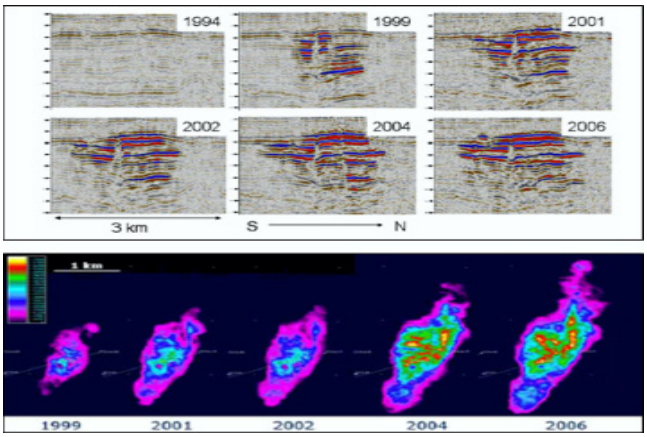

Fig. 2 (Tomada de Statoil Hydro: Proyecto Sleipner). Control 4D por amplitud sísmica de la evolución de la inyección de 8,4 millones de Tm de CO_2 almacenadas entre 1996 y 2006 en un área de 2,8 km^2 en la formación Utsira mediante sondeos direccionales.

- Almacenamientos de Residuos Radiactivos de Alta Actividad (RRAA): en este caso el comportamiento de la roca para albergar el depósito-almacenamiento de contenedores ("canister") de RRAA, ha de tener características impermeables y poder garantizar, durante decenas de miles de años, el aislamiento de los radionúclidos de la circulación del agua y, por, tanto de la Biosfera, Hidrosfera y Atmosfera, al mismo tiempo que debe permitir la difusión del calor generado por el residuo radiactivo.

Las litologías almacén contempladas para este tipo de almacenamientos son: en rocas sedimentarias impermeables, las arcillas o margas, la sal y las anhidritas, y en rocas ígneas los granitos u otro tipo de acumulaciones ígneas no fracturadas ni permeables.

Aunque este tipo de residuos queda englobado entre los denominados depósitos definitivos, cuentan con la particularidad de que han de ser accesibles para que en el caso futuro de posibles avances técnicos en el tratamiento descontaminante o reducción o anulación de la radioactividad de este tipo de residuos, puedan ser convenientemente recuperados y procesados.

Investigación de almacenamientos de gas

La investigación de este tipo de almacenamientos se lleva a cabo mediante el uso aplicado de técnicas exploratorias generalmente utilizadas en la industria de la investigación de hidrocarburos: interpretación sísmica 2D (Figura 3) y 3D y sondeos profundos. Se pueden

asociar en dos grupos: formaciones porosas y permeables, generalmente saturadas en agua salada, y formaciones salinas mediante la generación de cavernas por disolución de cavidades (Figura 1).

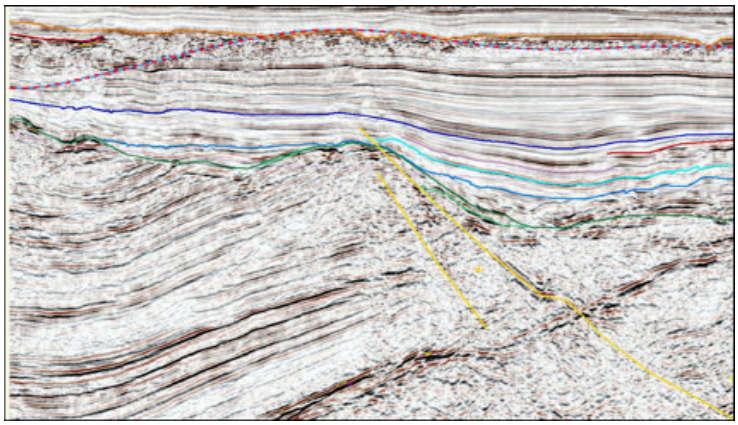

Fig. 3. Interpretación sísmica de trampas para almacenamientos en el subsuelo.

La investigación de formaciones porosas y permeables que generalmente corresponden a formaciones sedimentarias siliciclásticas o carbonáticas, aunque en casos pueden contemplarse formaciones ígneas fracturadas: Estas formaciones almacén requieren la existencia de una formación sello (impermeable y con suficiente potencia) y una trampa estanca (estructural, estratigráfica o mixta) que impida la migración del gas hacia capas suprayacentes al almacén. Constituyen los almacenamientos de mayor capacidad.

Las incertidumbres exploratorias generadas por este tipo de almacenamientos y a investigar mediante técnicas geológicas entre las que destacan las estratigráficas y tectónico-estructurales, así como la capacidad volumétrica real, son conocidas, en gran parte, en los yacimientos depletados, por lo que este tipo de yacimientos, mediante su reutilización como almacenamiento, constituyen el principal objetivo exploratorio.

Los yacimientos depletados tanto en tierra (ejemplo de Serrablo-Jaca) como en mar (ejemplo de Gaviota en España y otros futuros previstos en el golfo de Cádiz), además de abaratar costes exploratorios, también implica una gran reducción de costes de operación al contar con un gas colchón original que hace innecesaria la inyección y gasto de esta imprescindible acumulación de gas cuya extracción nunca se podrá llevar a cabo.

La caracterización de este tipo de almacenamientos conllevará la elaboración de un modelo estático 3D de la mayor precisión posible, que sintetice las características estratigráficas, sedimentológicas, y petrofísicas de la formación almacén, mediante

la generación de celdas del menor tamaño viable y con la integración de los datos petrofísicos aportados por las diagrafías de sondeos y su calado y extrapolación mediante el cubo sísmico 3D.

Así mismo, se ha de generar un modelo geológico tectónico-estructural que caracterice geométricamente y estructuralmente la trampa, así como su red de fracturación y garantice la seguridad del almacenamiento durante los sucesivos ciclos de inyección y extracción de gas. Para ello la interpretación sísmo-estructural y sismo-estratigráfica constituyen la herramienta de mayor precisión teniendo en cuenta la integración de los datos de sondeos.

A partir de esta información se generaría el *modelo dinámico 3D*, sobre el comportamiento del almacenamiento durante los procesos en los ciclos de llenado y vaciado, lo que conlleva un importante fin predictivo y aporta la cuarta dimensión (temporal 4D) al modelo. En este modelo también se han de predecir los posibles cambios que pueden afectar deteriorando la capacidad de almacenamiento (procesos de histéresis) durante los ciclos progresivos de inyección y extracción de gas durante el periodo de explotación del almacenamiento.

Los estudios por tanto han de conseguir la cuantificación de volúmenes almacenables (capacidad de almacenamiento) en relación a las presiones de inyección requeridas para el desplazamiento y sustitución por gas del agua salada de los poros o fracturas, así como la caracterización de la invasión de la pluma o burbuja de gas (de menor densidad) en su conflicto por la interferencia con los fluidos previos que rellenan los poros de la roca (generalmente agua salada).

Con todo ello se ha de proceder a la planificación del diseño de las técnicas de extracción, para la adecuación de presiones y caudales de operación así como el control de capacidad y volumen de almacenamiento.

Los estudios por tanto han de conseguir la cuantificación de volúmenes almacenables (capacidad de almacenamiento) en relación a las presiones de inyección requeridas para el desplazamiento y sustitución por gas del agua salada de los poros o fracturas, así como la caracterización de la invasión de la pluma o burbuja de gas (de menor densidad) en su conflicto por la interferencia con los fluidos previos que rellenan los poros de la roca (generalmente agua salada).

Con todo ello se ha de proceder a la planificación del diseño de las técnicas de extracción, para la adecuación de presiones y caudales de operación así como el control de capacidad y volumen de almacenamiento.

La exploración de los almacenamientos que no investigan antiguos yacimientos depletados, posee un mayor número de incertidumbres a resolver, ya que no se cuentan con los datos exploratorios, de capacidad o de operación previos, pero requieren una metodología exploratoria similar, eso sí, con mayores costes exploratorios debido al mayor número de incertidumbres geológicas por resolver.

La investigación de formaciones salinas, generalmente se centran en acumulaciones diapíricas (perforantes de las series suprayacentes) o post-diapíricas (diapiros desenraizados) (Figura 4) o almohadillas (no perforantes), en los que se pueden generar una serie de cavidades, mediante técnicas de disolución con generación de salmueras, con disposición de cavidades, con unas dimensiones y separación, que garanticen la estabilidad del almacenamiento frente a los ciclos de inyección y producción. Este tipo de Almacenamientos de Gas, disponen de menor capacidad pero de mayores caudales de operación y son generalmente denominados como almacenamientos "modulares" usados para conseguir rápidos equilibrios de presiones en los gaseoductos de los sistemas gasistas.

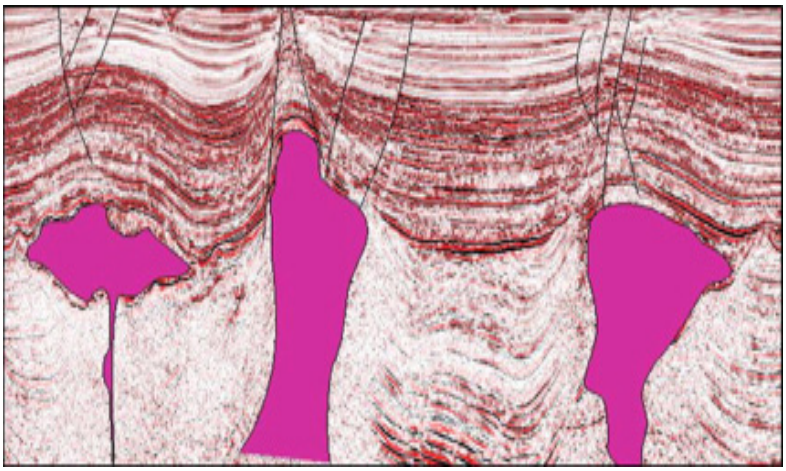

Fig. 4. Imagen sísmica interpretada de acumulaciones salinas diapíricas y post-diapiricas objetivos como almacenamientos de gas, CO_2, Aire comprimido o RRAA.

La sistemática exploratoria en este caso, mediante la aplicación de las mismas técnicas exploratorias (sísmica 2D y 3D y sondeos) se centra más en aspectos geométricos estructurales para la precisión de los flancos o límites de las acumulaciones salinas, así como en la homogenidad litológica, estratigráfica y estructural del cuerpo salino.

Aspectos como tectónica salina y halocinesis, cobran en estos almacenamientos un importante papel en los que conceptos como desarrollo del *caprock* insoluble y las

geometrías de *over-hang* y etapas de evolución halocinética desde la sal estratiforme a la etapa postdiapiro (con generación de diapiros descabezados y cicatrices salinas).

La investigación de posibles formaciones porosas y permeables, próximas, en profundidad para la evacuación de salmueras constituyen otros de los aspectos que son contemplados en el estudio de la viabilidad de estos almacenamientos.

Aunque este tipo de almacenamientos de cavidades salinas por disolución han sido investigados en España por organismos o compañías como IGME, ENAGAS, SHESA, STORENGY (Grupo Suez) e IBERDROLA, ninguno ha sido puesto en operación hasta la actualidad. Sin embargo existen numerosos ejemplos de almacenamientos operativos en países de nuestro entorno, como Portugal, Francia y Alemania.

Investigación de almacenamientos de aire comprimido (CAES)

Este tipo de almacenamientos, al igual que los almacenamientos de gas también pueden ser investigados tanto en cavidades disueltas en formaciones salinas como en formaciones porosas y permeables saturadas en agua salada.

En este caso, debido a los altos caudales requeridos, el objetivo prioritario está constituido por las cavidades disueltas en diapiros salinos.

La investigación de este tipo de almacenamientos se lleva a cabo mediante las técnicas similares a las aplicadas en los almacenamientos de gas, similares a su vez a las técnicas aplicadas en la industria de la investigación de hidrocarburos: interpretación sísmica 2D (Figura 3) y 3D y sondeos profundos.

Para estos objetivos las profundidades de investigación son más someras, de modo que los almacenamientos se consideran viables a partir del entorno de los 600 m de profundidad.

En España han sido llevadas a cabo investigaciones para almacenamientos profundos de este tipo por compañías del sector eléctrico, concretamente en formaciones salinas, aunque hasta la actualidad no se ha llegado a alcanzar el desarrollo de puesta en marcha de ciclos de inyección/compresión-producción/generación a partir de estos almacenamientos temporales de aire comprimido CAES.

Investigación de Almacenamientos de CO_2

Las actividades geológicas exploratorias para este tipo de almacenamientos, con ciertas

diferencias, son similares metodológicamente y en cuanto a objetivos almacén, a las de los almacenamientos de gas.

Al corresponder a depósitos definitivos de CO_2, y no ser requeridos procesos de producción, la gran capacidad del almacenamiento es un objetivo prioritario para la optimización de costes exploratorios y de operación.

Las profundidades objetivo son superiores a las requeridas para los almacenamientos CAES, ya que el CO_2 a almacenar requiere unas condiciones de presión y temperatura en las que alcance su punto crítico (condiciones de P y Tª a las que el CO_2 se comporta como fase líquida y es incompresible). A estas profundidades a las que el CO_2 adquiere su máxima densidad (en todo caso siempre inferior a la del agua) la capacidad de almacenamiento es la mayor posible en estas condiciones en las que el CO_2 alcanza las condiciones de incompresibilidad.

Los objetivos de almacenamientos en formaciones porosas y permeables requieren la conjugación de la roca almacén profunda (profundidad mínima requerida en torno a los 800 m según las condiciones locales de P y Tª hasta alcanzar las condiciones de estado crítico para CO_2) bajo una formación sello, todo ello englobado por una trampa que garantice la imposibilidad de escape o dismigración del CO_2 ascendiendo hacia formaciones más superficiales o a la atmósfera. (Figura 5).

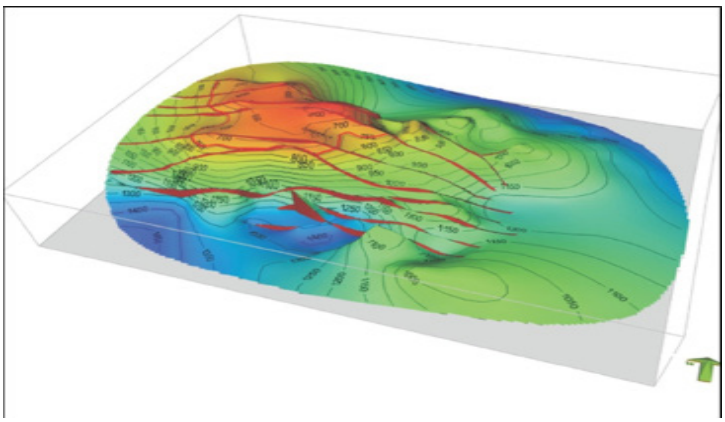

Fig. 5. Visualización 3D de una estructura trampa para un posible almacenamiento de CO_2. Fuente IGME

También, en este caso, aunque considerar como objetivo la posibilidad de almacenamientos depletados de hidrocarburos se considera prioritaria debido a las menores incertidumbres exploratorias que implican, generalmente este tipo de yacimientos, están siendo aprovechados para el almacenamiento de gas. A pesar de

esta consideración han sido llevadas a cabo ejemplos de investigación de este tipo de almacenamientos para CO_2 en el valle del Guadalquivir, o los almacenamientos de antiguos yacimientos de gas en Laqc en Francia (Total) y Statoil Hydro (Proyecto Sleipner en el Mar del Norte).

La Figura 2 recoge un modelo 4D de la compañía Statoil Hydro en un almacenamiento en el mar del Norte, que refleja la evolución de la inyección de una pluma de CO_2 entre 1999 y 2006 (proyecto Sleipner). La imagen sísmica muestra, como las amplitudes sísmicas diferenciales de la formación geológica Utsira, responden a la extensión en su crecimiento de la burbuja o pluma de gas.

Así pues, la investigación de almacenamientos de CO_2 en formaciones porosas y permeables saturadas de agua salada constituye el objetivo más realista en este tipo de depósitos definitivos y, al igual que los almacenamientos de gas, y según queda regulado en España por la ley de almacenamientos geológicos de CO_2, requieren la elaboración de un primer Modelo Geológico Estático 3D que sirva de base al desarrollo del Modelo Dinámico.

Así mismo, en los estudios a llevar a cabo se ha de generar un modelo tectónico-estructural que garantice geométricamente la trampa y la seguridad del almacenamiento durante la inyección del CO_2 en condiciones supercríticas. En este caso, la interpretación sismo-estructural y sismo-estratigráfica (Figura 3) constituyen las herramientas de mayor precisión teniendo en cuenta la integración de los datos de sondeo.

A partir de todo lo anterior, se ha de alcanzar la cuantificación de la capacidad de almacenamiento en relación a las condiciones de estado supercrítico del CO_2, presiones de inyección requeridas para el desplazamiento y sustitución por CO_2 del agua salada de los poros o fracturas, así como la caracterización de la invasión de la pluma o burbuja de CO_2 en su interferencia y reacción con el agua salada original que ocupa los poros de la roca almacén.

La sistemática exploratoria mediante la aplicación de las técnicas exploratorias de interpretación sísmica 2D y 3D y petrofísica de sondeos, se centra en aspectos geométricos estructurales para la precisión de los flancos o límites de las acumulaciones salinas, así como en la caracterización de la homogeneidad estratigráfica y estructural del cuerpo salino.

Como en el caso de los almacenamientos de gas en sales, los conceptos de tectónica salina y halocinesis, cobran en estos un importante objetivo a caracterizar.

Otros aspectos como la investigación posibles formaciones porosas y permeables, próximas, en profundidad para la evacuación de salmueras y construcción de salmoductos de conexión con el mar constituyen otros aspectos contemplados para el estudio de la viabilidad de este tipo de almacenamientos.

En España, los almacenamientos de CO_2 han sido investigados por organismos o compañías como CIUDEN (con su almacenamiento piloto de CO2 de Hontomín), IGME, CTR-REPSOL, CEPSA, HUNOSA, ENDESA, Unión Fenosa, Nuelgas e Instituto Petrofísico (IPF).

Investigación de Almacenamientos de Residuos Radiactivos de Alta Actividad (RRAA):

La investigación geológica de este tipo de almacenamientos para RRAA también ha sido llevada a cabo mediante las técnicas exploratorias de interpretación sísmica 2D y 3D y perforación de sondeos profundos.

El objetivo almacén en este caso, al contrario que para los almacenamientos de Gas o CO_2, está constituido por rocas impermeables bien de naturaleza sedimentaria: fundamentalmente arcillas o margas, sales y anhidritas o rocas ígneas no fracturadas en profundidad como los macizos graníticos homogéneos profundos.

Para este caso las características de la roca para albergar el depósito de contenedores de RRAA, requieren su homogeneidad e impermeabilidad y poder garantizar, durante decenas de miles de años, el aislamiento de los radionúclidos de la circulación del agua y, por tanto, de su aislamiento de la Biosfera, Hidrósfera o Atmosfera, al mismo tiempo que han de permitir la difusión del calor generado, especialmente en los primeros cientos de años.

Aunque para este tipo de residuos es requerido un almacenamiento de carácter de depósito definitivo, se ha de mantener la posibilidad de acceso y recuperación de la materia almacenada para su tratamiento ante la posibilidad de futuros desarrollos tecnológicos que permitan el tratamiento, reducción o eliminación inocua para el Medio Ambiente de este tipo de residuos.

- El almacenamiento en rocas ígneas impermeables en volúmenes no fracturados plantea la adecuación de los parámetros de adquisición de datos de la metodología sísmica a ese tipo de entornos geológicos, ya que la adquisición sísmica ha sido diseñada tradicional y fundamentalmente para medios sedimentarios anisótropos en cuanto a la

la investigación de medios isótropos (granitos o rocas metamórficas).

Experiencias de adquisición sísmica en granitos realizadas en España para la exploración de almacenamientos de RRAA, han permitido al menos la delimitación y definición tectónico-estructural de los cuerpos, aunque no de su arquitectura interna y posibles sistemas de fallas.

Experiencias de adquisición sísmica en granitos realizadas en España para la exploración de almacenamientos de RRAA, han permitido al menos la delimitación y definición tectónico-estructural de los cuerpos, aunque no de su arquitectura interna y posibles sistemas de fallas.

La perforación de sondeos, en este caso, toma un mayor peso específico en la exploración de estos almacenamientos, mediante la testificación geofísica y la extracción de testigo continuo. Así mismo, a partir del mallado de sondeos, toman especial relevancia las técnicas de tomografía sísmica cross-hole que permiten el reconocimiento de la fracturación entre sondeos y su extrapolación al resto del cuerpo granítico o ígneo.

La caracterización de la red de fracturas que pueden compartimentar o delimitar este tipo de rocas, por sus implicaciones hidrogeológicas, constituye un objetivo crucial en la caracterización del cuerpo, así mismo en cuanto a la homogeneidad o evolución de tendencias litológicas que puedan incidir en su homogeneidad.

Un cuerpo granítico extenso, homogéneo, no fracturado puede aportar al posible almacenamiento propiedades de impermeabilidad, estabilidad y potencial de disipación del calor generado por su alta transmisividad térmica, que repercuten en la viabilidad y seguridad de este tipo de depósitos.

- El almacenamiento de RRAA en rocas sedimentarias se investiga principalmente en formaciones impermeables de rocas salinas, anhidritas y formaciones arcillosas o margosas de baja proporción calcárea.

Para el estudio de todas ellas, como ya se ha citado anteriormente, se aplican técnicas exploratorias del subsuelo, similares a los programas de investigación de hidrocarburos, basadas fundamentalmente en la metodología sísmica 2D (Figura 3) y 3D, y en la perforación de sondeos profundos.

Los rangos de profundidad para estos estudios, al igual que para los almacenamientos de aire comprimido, suelen ser más someros, estableciéndose, orientativamente, un techo

de objetivo de al menos 600 m de profundidad, lo que facilita un posible acceso futuro a los RRAA, si ello fuese requerido en el futuro. Todo lo cual habrá de hacerse con la garantía de aislamiento de los RRAA de la Biosfera, y por tanto, de la Hidrosfera y Atmósfera.

De los tipos de litologías sedimentarias presentados como objetivo existen diversas experiencias mundiales de almacenamientos de RRAA en arcillas y margas, así como en sales. Debido al menor desarrollo, en importantes potencias homogéneas de anhidritas, sus estudios han sido de menor frecuencia en esta litología, aunque la presencia en España de acumulaciones anhidríticas de suficiente potencia y homogeneidad han permitido su consideración como objetivo y estudio en su momento.

Así pues, la impermeabilidad de las formaciones rocosas, su homogeneidad y el carácter de transmisividad y evacuación térmicas, las fomentan como objetivo en el subsuelo a caracterizar para albergar almacenamientos de RRAA.

También se ha de mencionar que en España desde hace más de dos décadas fueron abandonados los estudios para almacenamientos profundos de RRAA, estando en desarrollo almacenes temporales en superficie (ATC) que requieren otro tipo de estudios geológicos, geotécnicos, hidrogeológicos, geomorfológicos, medioambientales, etc. de superficie, así como de métodos de prospección geofísica somera.

Reflexión final

La investigación geológica del subsuelo, mediante las técnicas exploratorias adecuadas a partir de la información sísmica y de sondeos profundos integrada con otra información geológica disponible de aplicación (cartografías, estudios estratigráficos y sedimentológicos, información estructural, información petrológica y petrográfica, información geofísica, etc.), permiten al geólogo profesional su aplicación al bien y progreso de la sociedad, y el respeto y conservación de su medio ambiente.

En este sentido, los estudios geológicos de almacenamientos subterráneos aportan criterios e información tanto para la gestión segura de recursos energéticos (almacenamientos de gas y aire comprimido), como para conseguir la garantía medioambiental de depósitos o confinamiento de emisiones capturadas de CO_2, lo que favorece la lucha contra el cambio climático. En este sentido también se considera el aislamiento de los RRAA generados en las Centrales Nucleares, de vida media de decenas miles de años, en almacenamientos geológicos profundos específicos que garantizan su aislamiento de la Biosfera.

Se considera que el profesional de la Geología, por tanto, ha de tener una motivación

en el horizonte de estos importantes retos a resolver mediante una sólida formación geológica y la aplicación de las tecnologías más avanzadas en los programas exploratorios de investigación geológica.

El geólogo y la hidrogeología

Marc Martínez Parra
Diplomado en Hidrología Subterránea (FCIHS-UPC).
Eurogeólogo.

La hidrogeología o hidrología subterránea, según L. Mijailov (1985), es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, sus formas de yacimiento, difusión, movimiento, régimen y reservas, así como su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso), propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas) y las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación. Es, por tanto, una de las ramas más complejas de la Geología. Basta ver el índice del libro "Hidrología Subterránea" de E. Custodio y M.R. Llamas, obra cumbre de la hidrogeología en castellano, publicado en 1975 y plenamente vigente en la actualidad, para confirmar dicha complejidad.

Históricamente, el agua ha sido fuente de vida y de progreso. La utilización del agua subterránea está ligada a la evolución de las sociedades en los albores de la humanidad, ya que se necesitaban dotes de observación y de interpretación del medio natural para encontrar agua con la que sobrevivir. El ingenio humano para tener fácil acceso al agua llevó a captar manantiales y desarrollar métodos de construcción de pozos y galerías. En Persia aparecieron los qanats –un tipo de galerías o minas de agua- en el 1000 a.C.; con la Ruta de la Seda esta técnica llegó hasta China. Los celtas y griegos utilizaban determinados manantiales como lugares sagrados pero fueron los romanos quienes desarrollaron las técnicas de captación de aguas y creación de infraestructuras para su transporte y almacenamiento (acueductos, embalses), que posteriormente mejoraron los árabes. Sin embargo, no es hasta el año 1836 cuando se establecieron las bases de la Hidrogeología

moderna como ciencia, con la publicación, por parte del francés Henry Darcy, del libro *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, donde establecía la ley matemática – ley de Darcy – que rige el flujo subterráneo y supone la piedra angular de esta ciencia.

¿Qué es un hidrogeólogo?

Pero ¿qué es un hidrogeólogo? No existe una titulación universitaria como tal. Se estudia hidrogeología en licenciaturas como, entre otras, Ciencias Geológicas, Ingeniería de Minas o Ingeniería Forestal. Pero también hay muchos profesionales que, por experiencia en su trabajo, se autodenominan hidrogeólogos. Así podemos encontrar hidrogeólogos con las más diversas titulaciones medias y superiores: geólogos, ingenieros de minas, ingenieros forestales, ingenieros industriales, ingenieros geólogos, químicos, farmacéuticos, licenciados en ciencias ambientales, geógrafos, físicos, ingenieros técnicos de minas, de obras públicas o biólogos, entre otros. No es difícil comprender el motivo: cada una de las titulaciones estudia alguno de los aspectos científicos que conforman un todo que es la hidrogeología: así los biólogos están más relacionados con el estudio del suelo y de la contaminación por microorganismos, los farmacéuticos con los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos de agua y sus metodologías de determinación e interpretación, o los físicos, con la aplicación de las técnicas geofísicas en el medio hidrogeológico. Por ello, un hidrogeólogo debe manejar conocimientos de geología estructural, estratigrafía, fotogeología, cartografía geológica, pero también de climatología, hidrografía, física de los materiales, química analítica e isotópica, hidráulica, matemáticas avanzadas, métodos de perforación y de construcción, economía, legislación, etc. La conclusión es que el hidrogeólogo es un auténtico hombre-orquesta de la geología.

El curso de referencia en el mundo de la hidrogeología en España e Iberoamérica es el Curso Internacional de Hidrología Subterránea, para post-graduados, impartido de manera continuada desde 1967 por la Fundación Curso Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS), con la colaboración de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Se obtiene un Diploma de *Aptitud de la FCIHS y el Diploma de Postgrado de la UPC*. Desde el año 2002 también se puede realizar on-line, con la colaboración con diversos centros geográficos de apoyo, como, entre otros, la Universidad Complutense de Madrid.

Asimismo, existe una notable oferta en Másteres en las Universidades nacionales, que contemplan, en mayor o menor contenido, los aspectos relacionados con la hidrogeología, aunque en su mayoría presentan un contenido interdisciplinario que permite el acceso a mayor número de alumnos con diversas titulaciones. Desde hace 13 años, el “Master en hidrología y gestión de recursos hídricos” (Universidad de Alcalá-Universidad Rey Juan Carlos, UAH-URJC), con modalidades presencial y semipresencial, forma a investigadores y profesionales con varios módulos íntimamente relacionados con la hidrogeología y

su gestión. También se pueden citar, entre otros, el "Máster Universitario en Ciencia y Tecnología del agua y del terreno" de la Universidad Politécnica de Cartagena, el "Máster de Ciencia y Gestión Integral del Agua" de la Universitat de Barcelona (UB) o el "Master Universitario en Gestión Sostenible y Tecnologías del Agua" de la Universitat d'Alacant (UA).

Anteriormente existían otros cursos de especialización de gran tradición, como el Master en Hidrología Subterránea impartido por el ITGE-ETSIIM o el Curso de especialización en Hidrogeología "Noel Llopis", impartido en la Universidad Complutense desde 1967 a 2001, que alcanzó 35 ediciones y formó a 752 hidrogeólogos de diversas nacionalidades, quedando bruscamente interrumpido con la muerte del director del curso, su alma mater y motor del mismo, el Dr. José Ramón Peláez.

Por último, mencionar que el ICOG en su titulación profesional recoge la posibilidad de obtener el título de Geólogo Profesional Especialidad en Hidrogeología, con una experiencia probada de 5 años.

La labor que realiza

Versatilidad es la palabra que define el trabajo del hidrogeólogo. Si fuese un caso clínico, podría diagnosticarse como alguien que sufre de trastorno de identidad disociativo o, más corrientemente, personalidad múltiple. Las principales "personalidades" abarcan al medio ambiente, los estudios de carácter regional, la exploración, geotecnia, planificación, patrimonio o investigación, entre otras.

El hidrogeólogo encuentra su nicho laboral tanto en la Administración pública como en la empresa privada. En el primer caso, el hidrogeólogo suele localizarse en la Administración Hidráulica- estatal o autonómica- así como en la Universidad y Organismos Autónomos -Instituto Geológico y Minero de España (IGME) o el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)- entre otros. En la empresa privada, generalmente consultoras de diversos tamaños y mercados, nacionales o internacionales, forma parte del equipo técnico y directivo, o bien puede trabajar profesional autónomo, sea en trabajos especializados o atendiendo a la elaboración de informes y estudios locales. A medio camino de ambos mundos, el hidrogeólogo también participa en diversas fundaciones y ONG's relacionadas con la hidrogeología y los recursos hídricos.

Así, *grosso modo*, la hidrogeología laboralmente se aborda desde tres perspectivas principales: administración, docencia e investigación. Los trabajos pueden estar relacionados con el cumplimiento de diversas normativas legales y requisitos de estudios, bien como consultor frente a la administración, o como miembro de ella, con la actividad de

docencia, abordando la hidrogeología desde la divulgación científica y como investigador, tanto en el sector público o en el privado, ampliando conocimientos y metodologías así como hacia un desarrollo comercial de dichas investigaciones.

El hidrogeólogo frente a la Administración y los particulares

El hidrogeólogo participa en la realización de estudios técnico-científicos contratados por empresas o particulares con el fin de satisfacer trámites relacionados con la aplicación de diversa legislación relacionada con las aguas y el medio ambiente. Pueden ser desde estudios hidrogeológicos no muy extensos a memorias y trabajos dentro de proyectos de diversa índole.

Todas las normativas legales frente a la contaminación, en consonancia con el **RD 1514/2009, por el que se regula la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro** tienen una gran importancia en el trabajo del hidrogeólogo. Son estudios relacionados con las posibles afecciones al acuífero y las aguas subterráneas, tanto en la prevención, en la evaluación de la presencia de contaminantes, de carácter puntual o como difuso, que pueden verterse directa o indirectamente sobre el acuífero, de manera controlada o incontrolada como en el estudio del impacto que pueden tener las diversas actividades antrópicas, como obras civiles, explotaciones mineras, etc. y en la recuperación del medio hídrico.

La **Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados**, establece la eliminación de los mismos adoptando medidas que garanticen la protección del medio ambiente, contemplando para ello diversas operaciones que pueden precisar de la correspondiente valoración hidrogeológica como son su depósito en el suelo o en su interior y la inyección en profundidad. Relacionado con esta ley, el **RD 1481/2001 por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero**, establece, para su instalación, la descripción hidrogeológica del medio, la protección del suelo y las aguas subterráneas, una evaluación de seguridad hidrogeológica y procedimientos de control y vigilancia a posteriori que precisarán el concurso de un hidrogeólogo para la interpretación de los datos.

En general, el hidrogeólogo es el técnico competente para realizar estudios hidrogeológicos orientados a establecer si existe o no afección y la manera de corregir o mitigar los efectos asociados. El **art. 237 del RD 849/1986 Reglamento del Dominio Público Hidráulico** (en adelante RPDH) contempla que las concesiones o autorizaciones administrativas, relacionadas con obras o actividades en el dominio público hidráulico, susceptibles de contaminar o degradar el medio ambiente, requerirán la presentación de un estudio de evaluación de efectos medioambientales. Si la supuesta contaminación

o degradación del medio implicase afección de aguas subterráneas, el estudio incluirá la evaluación de las condiciones hidrogeológicas de la zona afectada, del eventual poder depurador del suelo y del subsuelo, de los riesgos de contaminación y de alteración de la calidad de las aguas subterráneas por el vertido, determinando si la solución que se propone es adecuada, especialmente si se tratase de vertidos directos o indirectos.

Específicamente, la Autoridad Hidráulica exige un *estudio hidrogeológico previo* para evitar la introducción de las sustancias peligrosas de la relación I (como, entre otros, compuestos organohalogenados, mercurio, cadmio y sus compuestos; hidrocarburos y sustancias sintéticas persistentes), para limitar la introducción de las sustancias de la relación II (cinc, cobre, cromo, arsénico, biocidas, nitritos, amonio, etc.) y para autorizar el vertido de sustancias no peligrosas (arts. 257 y 258 del RDPH). En aplicación de esta legislación, el hidrogeólogo elabora informes hidrogeológicos sobre los vertidos procedentes de instalaciones ganaderas, depuradoras, industrias de todo tipo (alimentarias, químicas, etc.), o vertederos, entre otros. Pero ¿qué debe contemplar uno de estos estudios? Según el art. 258 del RDPH debe contener un mínimo de características hidrogeológicas de zonas afectadas, poder depurador del suelo y subsuelo, riesgo de contaminación y alteración de aguas subterráneas y si medioambientalmente es inocuo y una solución adecuada. No obstante, en la Administración es frecuente recibir informes incompletos que son rechazados con el consiguiente gasto para el particular por lo que es recomendable emplear a profesionales hidrogeólogos que elaboren informes adecuados.

En relación con la protección del medio acuífero, la **Ley 1/2016 Texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación** tiene por objeto evitar o, cuando ello no sea posible, reducir y controlar la contaminación en atmósfera, agua y suelo, mediante el establecimiento de un sistema de prevención y control integrados de la contaminación. Para ello utiliza la figura de la ***Autorización Ambiental integrada***, que se aplica a actividades industriales como, entre otras, instalaciones de combustión, refinerías, industrias minerales, químicas, de gestión de residuos, mataderos o incluso el almacenamiento de CO_2. Para ello, la documentación debe incluir, entre otras, la determinación de los efectos de las emisiones y medidas para prevenir y controlar; asimismo, si la actividad implica el uso, producción o emisión de sustancias peligrosas relevantes, teniendo en cuenta la posibilidad de contaminación del suelo y la contaminación de las aguas subterráneas en el emplazamiento de la instalación, se requerirá un informe base antes de comenzar la explotación de la instalación o antes de la actualización de la autorización, que contendrá, entre otras, la información necesaria para establecer el estado de partida del suelo y las aguas subterráneas, y las medidas realizadas ante posibles sustancias peligrosas relacionadas con la instalación, para poder comparar cuantitativamente con el estado tras el cese definitivo de las actividades (art.12).

También en la misma se deberá tener en cuenta la **Ley 26/2007 de Responsabilidad Medioambiental**, que regula la responsabilidad de los operadores de prevenir, evitar y reparar los daños medioambientales, de conformidad con el artículo 45 de la Constitución y con los principios de prevención y de que «quien contamina paga».

La descontaminación de acuíferos no está sujeta a una normativa legislativa española específicamente, no así los suelos, regulada su descontaminación en la **Ley 22/2011 de Residuos y suelos contaminados**. También para evitar los efectos de la intrusión marina o de contaminantes se han desarrollado metodologías de barreras físicas, químicas o de inyección para detener el avance del contaminante con desigual resultado.

La **Ley 21/2013 de Evaluación Ambiental** establece, entre otras, las bases que deben regir la evaluación ambiental de los proyectos que puedan tener efectos significativos sobre el medio ambiente. El profesional hidrogeólogo puede ser requerido para la elaboración y/o participación en los estudios de evaluación de impacto ambiental ordinaria o simplificada de aquellos proyectos que pueden tener una clara influencia en las aguas subterráneas como son los proyectos de instalaciones agropecuarias, agrícolas, de industrias extractivas, energéticas (almacenamiento de CO2, entre otros), químicas, los proyectos de infraestructuras, de ingeniería hidráulica y gestión del agua o de residuos, entre otros. Su contenido contempla, el objeto y descripción del proyecto y sus acciones, en las fases de ejecución, explotación y desmantelamiento, la identificación y valoración de impactos, tanto en la solución propuesta como en sus alternativas, la evaluación de las repercusiones del proyecto en la Red Natura 2000 y el establecimiento de medidas preventivas, correctoras y compensatorias para reducir, eliminar o compensar los efectos ambientales significativos así como un programa de vigilancia y seguimiento ambiental. Específicamente se contemplan estos estudios para perforaciones geotérmicas de más de 500 m, perforaciones de más de 120 m para el abastecimiento de agua.

Otro aspecto de la protección de acuíferos, en su uso, lo estableció la **Directiva Marco del Agua** y su trasposición a la Legislación Española (RD 62/2003), que supuso un impulso laboral para los hidrogeólogos, ya que además de la necesidad de caracterización de las masas de agua subterránea dentro de los ciclos de planificación y la protección de ecosistemas relacionados con las mismas, contemplaba la obligatoriedad de elaborar perímetros de protección para captaciones que suministran agua de origen subterráneo a más de 50 habitantes. Este último aspecto es importante en el Estado español ya que, según el Libro Blanco del Agua Subterránea de 1995, la población que emplea agua subterránea para el abastecimiento se cifra en 12.000.000 de habitantes, aunque si consideramos los núcleos urbanos, 70% de términos municipales inferiores a 20.000 habitantes se abastecen de agua subterránea. El artículo 173 del RDPH, establece que cuando se trate de aprovechamientos de aguas subterráneas destinados al consumo

humano que suministran un promedio diario superior a 10 m^3 o sirven a más de 50 personas, se podrá exigir un informe técnico que contemple, entre otros, los siguientes aspectos:

a) Propuesta de delimitación del perímetro en base a las características hidrogeológicas del acuífero, a las características, régimen de explotación y área de influencia de la captación y a la preservación de la cantidad y calidad del recurso captado.

b) Información sobre las figuras de ordenación y zonificación territorial vigente que la afecten.

El hidrogeólogo es el profesional más adecuado, sino el único, para llevarlo a cabo. Los perímetros de protección en cantidad y calidad de las aguas subterráneas son figuras no normalizadas que contemplan la protección y la restricción de actividades en una superficie en la que se moviliza el agua subterránea que se extrae por una captación. Como criterios de delimitación se emplean el radio de influencia de la propia captación, el tiempo de tránsito de un potencial contaminante hasta la captación y el criterio hidrogeológico. Para evitar restricciones innecesarias, los técnicos suelen zonificar los perímetros en zonas de restricción absoluta, máxima y moderada, variando en las mismas el tipo de actividad restringida.

La ordenación urbana también es una figura de potencial interés para el hidrogeólogo. Las competencias urbanísticas corresponden a las Comunidades Autónomas que han desarrollado sus propias normativas legales. Los estudios relacionados con los diversos documentos técnicos relacionados con los planes (memoria informativa, memoria justificativa, etc.) pueden precisar de una adecuada valoración hidrogeológica, máxime si se debe solicitar a las confederaciones hidrográficas el pertinente informe de existencia de recursos.

Un aspecto importante es el asesoramiento de particulares y empresas en las solicitudes de concesión de aguas subterráneas que se tramitan en las confederaciones hidrográficas, en las que puede ser necesaria una descripción hidrogeológica en la documentación, dentro del proyecto. Asimismo, es posible que en la tramitación se soliciten estudios hidrogeológicos específicos, como, por ejemplo, los que evalúen la capacidad del acuífero de proporcionar el volumen solicitado o ensayos de bombeo que permitan establecer si el caudal de explotación podría satisfacer el volumen solicitado. También se realizan para ayuntamientos informes sobre la idoneidad geológica del emplazamiento de cementerios y de sus ampliaciones. Un aspecto menos conocido y relacionado con las concesiones es el abandono y sellado de las captaciones, tal como se establece en el artículo 188 bis del RDPH.

Este asesoramiento también alcanza a las **Comunidades de Usuarios de Unidades Hidrogeológicas** y de acuíferos, que se establecen en el art. 87 del RDL 1/2001 Texto Refundido de la Ley de Aguas (en adelante TRLA). Entre los objetivos de la AEUAS (Asociación Española de Usuarios de Aguas Subterráneas) figura acciones para la protección, defensa y conocimiento de los aprovechamientos de aguas subterráneas. Ello precisa de profesionales en la Hidrogeología como asesoramiento.

En el asesoramiento para la tramitación de las declaraciones y los derechos de explotación de las aguas minerales y/o termales, incluyendo las aguas comercializadas en envases (minerales naturales, de manantial) el concurso del hidrogeólogo es preciso, al ser necesario elaborar los estudios hidrogeológicos de apoyo solicitados por la Administración autonómica, así como la elaboración del perímetro de protección cuantitativo y cualitativo que se establece para la protección de las captaciones. Así, en el Decreto 4/1995 por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 8/1990 reguladora del Aprovechamiento, ordenación y Fomento de las aguas minerales y termales de Castilla-La Mancha, se establece la necesidad de la elaboración de un estudio hidrogeológico (art.3).

Fig. 1. Vadmalahver (Secret Lagoon). Surgencia termal en Flúðir, Islandia (Marc Martinez).

El hidrogeólogo y la planificación: en la Administración y desde la misma

La labor de los hidrogeólogos en la Administración Hidráulica se concentra principalmente en la planificación hidrológica, con la obtención y mejora de la información hidrogeológica tanto para la protección como para la adecuada gestión de los recursos hídricos subterráneos. Según el RDL 1/2001 (art.40) los objetivos generales de la planificación hidrológica son conseguir el buen estado y la adecuada protección del dominio público hidráulico, satisfacción de las demandas de agua, el equilibrio y

armonización del desarrollo regional y sectorial, incrementando las disponibilidades del recurso, protegiendo su calidad, economizando su empleo y racionalizando sus usos en armonía con el medio ambiente y los demás recursos naturales. Así se establece en las funciones de la Dirección General del Agua, que, entre otras funciones, contempla la realización del Plan Hidrológico Nacional, el establecimiento de criterios homogéneos para los Planes hidrogeológicos de cuenca, el seguimiento y control del buen estado de las aguas subterráneas (redes oficiales), realización de estudios y desarrollo de normativas. Dentro de las Confederaciones Hidrográficas, las Oficinas de Planificación Hidrológica, contemplan como sus funciones (RD 984/1989) la recopilación y, en su caso, la realización de los trabajos y estudios necesarios para la elaboración, seguimiento y revisión del Plan hidrológico de la cuenca, informar de la compatibilidad con el mencionado Plan de las actuaciones propuestas por los usuarios (concesiones) y la redacción de los Planes de ordenación de las extracciones en acuíferos declarados sobreexplotados o en riesgo de estarlo y de aquellos otros en proceso de salinización, siendo la función de la Comisaría de Aguas la inspección y vigilancia de las explotaciones, el análisis y control de la calidad de las aguas continentales, así como la propuesta y seguimiento de los programas de calidad del agua, pudiendo gestionar también las redes de piezometría y de calidad de las aguas subterráneas.

Los informes de compatibilidad con el Plan hidrológico de cuenca es uno de los trabajos que mayor dedicación llevan en las Oficinas de Planificación, por cuanto es continuo el tránsito de expedientes a informar. También se deben realizar, dentro de los trámites de la planificación urbana, los informes de existencia de recursos. En ambos tipos de informes es preciso el conocimiento hidrogeológico local y regional.

Es preciso, por tanto, que todas las Administraciones Públicas, dispongan de técnicos cualificados en materia de aguas subterráneas, que permitan establecer asesoramientos adecuados, valoraciones de los problemas así como una eficaz gestión hídrica. En la actualidad, en las Confederaciones Hidrográficas se incorporan hidrogeólogos a las plantillas, sin embargo, parecen estar por debajo de sus necesidades. En el año 2005, un número aproximado de funcionarios hidrogeólogos en la Administración Hidráulica del estado era de 18 y en la administración autonómica ascendía a 14. Alarmaba que en algunas Cuencas Hidrográficas no hubiese hidrogeólogos o fuese ínfima su presencia en plantilla (Guadalquivir, Norte, Guadiana). Esta falta de técnicos especialistas funcionarios era suplida habitualmente mediante contrataciones de consultoras o convenios con el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), que entonces sumaba 51 profesionales en hidrogeología, un 70% más del total de todas las Administraciones juntas. En la actualidad, 12 años más tarde, la situación de precariedad de especialistas en hidrogeología en la Administración se mantiene, agravándose a su vez con la disminución de plazas de hidrogeólogos en el IGME; así, en la Administración del Estado y organismos autónomos

pueden alcanzar los 19, siendo significativo el mantenimiento de la inexistencia de hidrogeólogos en las mismas Demarcaciones Hidrográficas descritas para el año 2005: Guadalquivir, Guadiana, Cantábrico Oriental, Occidental, a la que se añade la del Miño-Sil. Aunque en diversos foros, como Congreso de la AIH-GE, acaecido en Madrid en el año 2016, se ha expresado por parte del colectivo la necesidad de que la administración incorpore en la plantilla de funcionarios más hidrogeólogos, vista la evolución desde 2005, no parece probable un aumento súbito, por lo que es preciso una mayor sensibilización de las autoridades decisorias en la planificación de los recursos humanos. Dicha sensibilización debe ser ejercida de manera continuada por colegios profesionales como el ICOG y asociaciones de profesionales de la materia, como al AIH-GE, el Club del Agua Subterránea o la AEH.

Históricamente, el IGME, como organismo autónomo, tuvo un papel fundamental en el desarrollo hidráulico en España, con planes infraestructurales como el *Plan Nacional de Abastecimiento de Núcleos Urbanos (PANU)*, desarrollado desde 1975, que permitió abastecer a 1.766.769 habitantes, o el *Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS)*, fundamental para la obtención de información hidrogeológica en España (López Geta, 2000). Sin embargo, el IGME ha pertenecido en los últimos 32 años a seis ministerios distintos: de Industria y Energía, de Medio Ambiente, de Ciencia y Tecnología; Educación y Ciencia, de Economía, Industria y Competitividad y en la actualidad al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Este hecho, junto a la redefinición de sus funciones, con una potenciación en su vocación investigadora y una disminución del personal técnico especializado en hidrogeología, ha creado una incógnita en cuanto a su relación y asesoramiento a las diversas administraciones, y en especial a las Hidráulicas.

Otras administraciones, como las autonómicas, provinciales y locales, bien como entidades de derecho público o empresas públicas, pueden disponer de hidrogeólogos según su política propia. Específicamente, la competencia autonómica en materia de aguas, como es la ordenación y participación en la gestión del agua y de los abastecimientos debería favorecer la incorporación de hidrogeólogos para desarrollar trabajos técnicos y de planificación. También las Diputaciones pueden llevar obras relacionadas con el abastecimiento a municipios. Se debe destacar a la Diputación de Alicante, en su departamento del Ciclo Hídrico, como pionera al disponer de un experimentado equipo en hidrogeología, ejemplo que, desgraciadamente, no ha tenido continuación en otras diputaciones.

Uno de los trabajos de hidrogeología más clásicos corresponde a la elaboración los denominados estudios hidrogeológicos de carácter regional, fundamentales para la toma de decisiones en la planificación hidrológica por parte de la administración, en los

que se describen acuíferos o sistemas acuíferos y sus características: físicas, hidráulicas (parámetros, funcionamiento hidrodinámico), calidad de las aguas, usos, recursos (balance hídrico, disponibilidad del recurso).

Por tanto, atendiendo a las labores de la Administración Hidráulica, es fundamental un adecundo conocimiento de las formaciones acuíferas. Ello se inició mediante la realización de estudios regionales, durante las décadas de los 70 y 80 del siglo pasado, el IGME desarrolló estudios regionales pioneros, como el mencionado PIAS, estableciendo el conocimiento básico de los acuíferos que en muchos casos no se mejoró. Posteriormente, se definieron por la DGOH-IGME las Unidades Hidrogeológicas (UU.HH.) como unidad físico-administrativa de gestión, con el fin de simplificar y ayudar al gestor en la administración de los acuíferos. No obstante, existían "lagunas" en el conocimiento hídrico, que se evidenciaron en el documento elaborado por ITGE-DGOH en 1999, que evaluaba el conocimiento entonces existente sobre las UU.HH. estableciéndose un desconocimiento parcial de ellas entre el 57 y 100% del total de UU.HH. por lo que precisaban de estudios hidrogeológicos detallados.

La implantación de la DMA en el año 2000 y su trasposición a la legislación española en el año 2003, llevó al obligado cumplimiento de la caracterización básica de la nueva unidad físico-administrativa de gestión hídrica- la masa de agua subterránea (en adelante MASb)- y la evaluación del cumplimiento de los objetivos medioambientales. Para satisfacer las necesidades de caracterización de las MASb para cumplir con los plazos establecidos en Europa en cuanto a los planes hidrológicos de cuenca, tanto del primer ciclo de planificación (PH2008-2015) como el segundo (PH2016-21), se realizaron estudios de caracterización de las MASb en riesgo de no lograr los objetivos de buen estado. Fueron trabajos dirigidos por el IGME y la Dirección General del Agua para todas las demarcaciones hidrográficas, concretándose en un conjunto de actividades que se basaban, en su mayor parte, en la recopilación y reinterpretación de datos hidrogeológicos ya existentes. Ello mostró la necesidad imperante en la mayoría de las demarcaciones de actualizar y mejorar el conocimiento de las MASb, en concordancia con el estudio elaborado en 1999 para las UU.HH. Un vistazo a esas actividades resume las principales inquietudes de la Administración en cuanto a las carencias del conocimiento hidrogeológico.

Otro aspecto de la planificación es la incorporación de las aguas subterráneas mediante el uso conjunto. La combinación de las aguas superficiales y subterráneas en periodos húmedos o extremadamente secos precisan de un conocimiento amplio de la hidrogeología por parte del gestor, que a su vez se puede apoyar en modelos matemáticos de simulación de flujo como de gestión, siendo el más conocido de los últimos mencionados en España el AQUATOOL, desarrollado por la Universitat Politècnica de València. La utilización de aguas superficiales en épocas húmedas, utilizando el excedente para recargar acuíferos

que se emplearán en épocas de sequía es práctica habitual en Estados Unidos pero en España tiene un escaso arraigo, a causa de una concepción "superficialista" del agua en la administración.

	Actividades realizadas por el IGME para la Dirección General del Agua
1	Diseño y aplicación de un sistema de intercambio de información hidrogeológica.
2	Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales.
3	Seguimiento y asistencia técnica en el proceso de planificación hidrológica
4	Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descargas por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico.
5	Mapa de piezometría de España.
6	Actuaciones en aguas subterráneas para la revisión de los planes de sequía.
7	Establecimiento de indicadores de intrusión marina y cálculo de los volúmenes ambientales al mar.
8	Selección e identificación de masas de agua donde es preciso plantear estudios y actuaciones de recarga artificial de acuíferos.
9	Protección de las aguas subterráneas empleadas para consumo humano según los requerimientos de la Directiva Marco del Agua.
10	Apoyo a la implementación de la Directiva de protección de aguas subterráneas. Determinación de tendencias y de puntos de partida para la inversión de tendencia.
11	Colaboración para la aplicación, en masas en riesgo por nitratos, de herramientas de análisis de presiones e impactos.
12	Organización y celebración de cursos de formación en países Iberoamericanos
13	Colaboración científico-técnica en materia de hidrogeología y calidad ambiental con países iberoamericanos, del Mediterráneo y de la EECCA.
14	Compilación de fuentes de datos, desarrollo de métodos y criterios geológicos en el análisis para la elaboración de cartografía de áreas inundables por avenidas torrenciales.

El desarrollo de nuevas metodologías o metodologías específicas para incrementar los recursos hídricos, como son los métodos de recarga artificial o desalación de aguas salobres de acuíferos con agua de mala calidad para uso humano también pueden precisar del concurso del profesional hidrogeólogo.

El impacto de las sequías puede mitigarse con una adecuada planificación que incorpore a las aguas subterráneas. La planificación ante situaciones de sequía es obligación de las diversas administraciones hidráulicas, y de los gestores –públicos o privados– encargados del abastecimiento de más de 20.000 habitantes. No obstante, las administraciones locales, provinciales y autonómicas, podrían tener un papel más activo para afrontar estas crisis climáticas mediante la participación de la elaboración de sus propios planes de sequía por parte de profesionales hidrogeólogos.

Por último, señalar que la participación del hidrogeólogo es importante en la elaboración o modificación de textos legislativos, tanto nacionales como europeos, puesto que resulta fundamental para una adecuada visualización de las soluciones a plantear frente a las problemáticas existentes. A grandes trazos, estas intervenciones se pueden agrupar en:

- Grupos de trabajo coordinados por la Administración hidráulica, en los que participan hidrogeólogos especialistas de diversos ámbitos y organismos suponen una herramienta útil para la consecución de tal fin.

- Participación en los grupos de trabajo en la participación pública en la redacción de los Planes hidrológicos de cuenca en los distintos ciclos de planificación. Esta participación se puede producir de manera individual, dentro de un colectivo, de un colegio profesional o de una asociación especializada (AIH-GE, CAS, etc.).

- Propuestas por parte de grupos de trabajo coordinados por Asociaciones de hidrogeólogos y Universidades, como el grupo de trabajo para la modificación del Texto Refundido de la Ley de Aguas en 2006, o las aportaciones de la AIH-GE en 2016.

El hidrogeólogo explorador. ¿Dónde hay agua?

La ubicación de captaciones de aguas subterráneas, es, quizás, uno de los trabajos más clásicos del hidrogeólogo. El objeto es buscar formaciones acuíferas con agua en suficiente cantidad y calidad y para ello se deben encontrar las mejores localizaciones con el fin de extraer agua para diferentes usos: abastecimiento, riego o industria. Aparte de todo el papeleo legal que conlleve, el hidrogeólogo debe aplicar todo su conocimiento y experiencia en la interpretación de mapas geológicos y estructuras, así como las dotes de observación en un minucioso trabajo en campo para determinar el mejor lugar para emplazar una captación, apoyándose o no, en técnicas geofísicas.

Una vez decidido el emplazamiento del sondeo de investigación, debe ejecutarse dicho sondeo con el concurso de empresas perforadoras profesionales con solvencia, garantía de un trabajo correcto.

Fig. 2. Desarrollo de un sondeo en Graja de Iniesta (Cuenca) Fotografía: Marc Martínez.

Fig. 3. Muestras de perforación de un sondeo a rotopercusión Fotografía: Marc Martínez.

A pie de obra, la función del hidrogeólogo es fundamental. Una vez iniciada la obra, debe levantar la columna litológica (con apoyo o no de testificación geofísica, en función del método de perforación), identificar los tramos filtrantes, diseñar el entubado y los prefiltros o macizos, desarrollar la captación y estimar un caudal de explotación, que luego confirmará mediante la realización de un ensayo de bombeo, preferiblemente a caudal continuo y con una duración mínima de 24 horas. Todo ello en coordinación con los diferentes técnicos presentes (sondistas, técnicos de minas, realizadores de los ensayos de bombeo, etc.). El conjunto de información debería desembocar en un documento técnico con la descripción de las actividades y recomendaciones para el particular; desgraciadamente, esto es común ante la Administración y empresas pero no tanto ante particulares, que suelen obviar la presencia de un técnico. Pero no todo el trabajo finaliza ahí. El deterioro y envejecimiento de las mencionadas captaciones precisará de técnicas geofísicas de reconocimiento, generalmente videográfico, para analizar el estado de la captación y proponer las posibles medidas de recuperación de las captaciones.

El contenido mínimo de un estudio hidrogeológico se recoge en el cuadro adjunto. Es básico conocer la zona de estudio. Para ello se realiza un trabajo de gabinete –recopilación bibliográfica-fotogeología, climatología- y un trabajo de campo- inventario de puntos de agua, descripción geológica, muestreo, medidas de caudal, de nivel piezométrico, usos del agua y focos de contaminación- Se puede plantear una campaña de geofísica, sin embargo, su coste desanima al particular en su uso. Un estudio de estas características no es un simple acopio de información, es imprescindible que sea detallado y muy descriptivo de la parte del acuífero del entorno estudiado. Se deben identificar y describir los principales acuíferos, sus parámetros hidráulicos, el quimismo de sus aguas, su funcionamiento hidrodinámico. Pero la hidrogeología no es el único criterio a considerar a la hora de elaborar el informe; se debe contemplar la proximidad de las instalaciones existentes -corriente eléctrica, canalizaciones, depósito– así como la facilidad de acceso a las mismas.

1. INTRODUCCIÓN
2. (ANTECEDENTES)
3. ABASTECIMIENTO ACTUAL
4. (ESTUDIO CLIMÁTICO).
5. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS.
   - Estratigrafía
   - Estructura
6. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS
   - Inventario de puntos de agua
   - Formaciones geológicas susceptibles de constituir acuíferos
   - Hidroquímica. Calidad de las aguas
7. FOCOS DE CONTAMINACIÓN. ESTIMACIÓN DE VULNERABILIDAD.
8. ALTERNATIVAS DE CAPTACIÓN DE AGUAS
9. CARACTERÍSTICAS DE LAS PROPUESTAS PARA LA MEJORA DEL ABASTECIMIENTO
10. BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS: MAPA DE SITUACIÓN, MAPA GEOLÓGICO, MAPA HIDROGEOLÓGICO.

Índice standard del contenido de un estudio hidrogeológico de abastecimiento. En paréntesis los capítulos que pueden estar ausentes por falta de información o por no ser estrictamente necesarios.

El hidrogeólogo investigador: futuras líneas

La investigación en hidrogeología abarca todos los eventos que suceden a una gota de agua durante su recorrido por el ciclo hidrológico, desde la su estancia en la nube hasta su salida por un manantial, drenaje difuso o hacia el mar, caracterizándose, en todos sus aspectos, los medios por los que circula (suelo, zona no saturada, acuífero). Así se pueden encontrar investigaciones tan variopintas como son el comportamiento de las aguas subterráneas en acuíferos carbonáticos y/o karstificados, la presencia de arsénico en las aguas subterráneas, el funcionamiento hidrodinámico de las aguas subterráneas presentes en grandes masas de hielo como en la Antártida o la utilización del quimismo de las aguas para la predicción de movimientos sísmicos. Incluso se ha especulado sobre el estudio del comportamiento de posible agua subterránea en otros planetas como Marte.

No obstante, el futuro de la hidrogeología está indisolublemente ligado a la influencia del ser humano en el ciclo hidrológico. Como dice Wagener *et al*. (2010), predecir la respuesta de los sistemas hidrológicos en un ambiente cambiante, requiere que el ciclo del agua se considere como un sistema complejo e interconectado que incluye subsistemas e interacciones con aspectos biogeoquímicos, ecológicos, físicos y humanos. Aunque evidentemente existen muchas líneas de investigación, Voss (ed.) (2005) y, recientemente, las Jornadas de Hidrogeología emergente, organizadas por el CIHS en 2016, contemplan como tendencias principales las siguientes:

- Desarrollo de herramientas informáticas para problemas precisos. Problema Inverso, modelos estocásticos.
- Nuevas técnicas geofísicas. Desarrollo de la teledetección en hidrogeología.
- Tecnología de recuperación y descontaminación de acuíferos.
- Influencia del cambio climático e impactos a medio y largo plazo.
- Estudio de contaminantes emergentes.
- Técnicas del fracking.
- Desarrollo de nuevos métodos paramétricos para estimación de la recarga y vulnerabilidad específica e intrínseca.
- Nuevos modelos hidrogeológicos de funcionamiento hidrodinámico en rocas fracturadas y kársticas.
- Hidrogeología profunda.
- Estudio de la ZNS.

- Perspectivas en el ámbito digital (SIG, geoinformación y geoservicios en la web).
- Exploración y aprovechamiento geotérmico somero.

La investigación hidrogeológica en España tiene sus luces pero también sus sombras. La realización de investigaciones y tesis doctorales acarrean una importante necesidad de soporte económico. Así, aparte del consabido gasto que supone el desplazamiento a la zona de estudio y el reconocimiento hidrogeológico en campo, que se suple con el esfuerzo y la dedicación de los investigadores, se deben añadir los gastos no-habituales en otras especialidades geológicas.

La hidrogeología en España se ha investigado desde las universidades, asociada principalmente a las facultades y departamentos de Ciencias Geológicas o relacionados con las ciencias de la Tierra y desde las escuelas técnicas superiores de las universidades politécnicas. En algunas de estas universidades existen grupos de investigación, como en la Universidad Complutense de Madrid (Grupo de investigaciones hídricas y medio ambiente), de Alcalá de Henares (Grupo de Agua, clima y medio ambiente) o de Castilla-La Mancha (Grupo de Hidrogeología) ; también existen centros asociados como son el CEHIUMA (Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga), el Instituto del Agua (Universidad de Granada), el Instituto de Investigación del Agua (IdRA) de la Universidad de Barcelona, o el Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universitat Politècnica de Valencia, así como organismos públicos de investigación como el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) o el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y fundaciones del sector público (como es el caso de IMDEA en la Comunidad de Madrid).

Otros campos de trabajo del hidrogeólogo

La hidrogeología se aplica en geotecnia para conocer si existen acuíferos y como pueden afectar a las obras y construcciones. Se aplican en las obras de construcción en el subsuelo para evitar posibles inundaciones de bajos, sótanos y parkings, como ocurre con relativa frecuencia, relacionado con los ascensos del nivel piezométrico de los acuíferos cuaternarios sobre los que se asientan ciudades como Barcelona y Murcia, o a causa de drenajes inapropiados. Gran importancia también tienen en relación con la ejecución de la construcción de obras lineales como túneles, ferrocarriles, vías de circulación (autopistas, autovías, etc.) así como otras infraestructuras como embalses y presas.

El Convenio Internacional suscrito en Ramsar (Irán) en 1971, relativo a la protección, conservación y uso racional de los humedales de importancia internacional, conlleva la necesidad de un mayor conocimiento de los mismos y a él se encontraban adheridos en

2011 un total de 160 estados, entre ellos, España. Su aplicación y la creación de espacios naturales protegidos conducirían a precisar la incorporación de hidrogeólogos, para el estudio de los humedales relacionados con las aguas subterráneas, así como su evolución y posibles afecciones. A septiembre de 2014 existen catalogados 74 de estos humedales, con diferente nivel de protección.

El patrimonio hidrogeológico incorpora al concepto de patrimonio geológico los elementos renovables como son las aguas subterráneas y sus manifestaciones externas singulares. Los puntos catalogados dentro del patrimonio hidrogeológico presentan características que los hacen únicos, ya sea por su rareza, por su historia o por representar las características químicas o hidráulicas de una formación acuífera. Se han propuesto como criterios de clasificación el interés hidrogeológico, la existencia de algún tipo de declaración de uso, el interés histórico-artístico y uso tradicional y el termalismo. Su fragilidad ante las actividades antrópicas puede llevar a un rápido deterioro y a la pérdida irremediable de este legado; por ello, para su conservación es imprescindible su catalogación y definición de medidas de protección (Martínez y Moreno, 2004).

Fig. 4-.Patrimonio hidrogeológico. Fuente de la Foncalada (Oviedo). Fotografía Marc Martínez).

Otros temas es la relación de la hidrogeología y el petróleo, almacenamiento profundo de CO_2 y de residuos radiactivos con el desarrollo de metodologías y estudios de la baja permeabilidad.

También el estudio de la influencia del cambio climático en las aguas subterráneas (disminución del recurso, de la calidad de las aguas, etc.) es un campo que se abre hacia la necesidad de emplear al profesional hidrogeólogo.

El hidrogeólogo en la sociedad

Existe una diferente percepción social entre la hidrogeología y el hidrogeólogo. Si bien la hidrogeología ha logrado tener un mayor arraigo y presencia mediática, de la mano de la protección de las aguas y del medio ambiente, no ocurre igual con el profesional hidrogeólogo, el eterno ignorado por parte de la sociedad.

Las asociaciones de hidrogeólogos en España están más orientadas a fomentar el desarrollo y conocimiento de la hidrogeología, favorecer la formación en la misma y facilitar los encuentros entre técnicos y científicos mediante congresos y reuniones especializadas; aunque hay un componente divulgativo, mayormente siempre está orientado hacia el profesional. Es habitual en los congresos hablar de la escasa incidencia que se tiene hacia los medios y la sociedad en general.

Los hidrogeólogos en España se agrupan principalmente en tres grandes asociaciones - Asociación Española de Hidrogeólogos (AEH), Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español- (AIH-GE), Club del Agua Subterránea (CAS) - con objetivos muy similares, como son promover y fomentar el conocimiento científico, mediante, entre otras, la organización de jornadas, congresos y reuniones, las relaciones con otras asociaciones, el diálogo con la administración y la participación en propuestas legislativas y la publicación de documentación técnica-científica.

También existen diversas agrupaciones, organizaciones, fundaciones o asociaciones que tiene relación con el mundo del agua subterránea. Entre todas ellas destacan la FNCA y la FCIHS. La Fundación Nueva Cultura del Agua (FNCA) tiene como misión, según su página web: *recoger, integrar, generar y transmitir conocimiento y valores humanos para promover la adopción de la Nueva Cultura del Agua, entendida ésta como un cambio de paradigma hacia la sostenibilidad ambiental, económica, social y cultural, orientado a una consideración ecosistémica y patrimonial del agua. Esto se realizará mediante la participación activa en la sociedad y el impulso en los ámbitos de decisión de alternativas coherentes con la Nueva Cultura del Agua.* La Fundación Curso Internacional de Hidrología Subterránea (FICHS) tiene como objetivos formar, promocionar, realizar, propiciar, dar soporte y divulgar todos aquellos aspectos relacionados con la hidrogeología.

Respecto a labores de divulgación y acercamiento a la sociedad, destaca la que lleva a cabo el IGME, realizando diverso material de divulgación sobre las aguas subterráneas con otras instituciones, como el libro *Las aguas subterráneas: un recurso natural del subsuelo*, en 2009, junto a la Fundación Botín, destacando las aplicaciones informáticas y programas interactivos relacionados con *Ploppy*, la defensora de las aguas subterráneas actualmente en la denominada Zona infantil/Las mascotas del IGME de su página web,

(http://ploppy.igme.es/), orientada hacia la divulgación en los colegios, desarrollándose diverso material divulgativo asociado y participando habitualmente en diversas ferias y actos divulgativos como la Feria Madrid es Ciencia.

La visión que tiene la sociedad del hidrogeólogo viene mediatizada por el ninguneo que los medios de comunicación ejercen, especialmente los audiovisuales, a la profesión de hidrogeólogo, favoreciendo a la cuestionada imagen del zahorí, constituyendo un flagrante ejemplo de intrusismo profesional y de engaño al ciudadano. El zahorí o varillero es un ser presuntamente dotado de poderes paranormales, una especie de "mutante", miembro de los cinematográficos X-Men, viva imagen de la España Negra y supersticiosa, capaz, con o sin ayuda de aparatos, mediante sacudidas y convulsiones, de localizar agua y disfrutar del don de la infalibilidad, puesto que, según su testimonio, nunca falla. Todo ello se ve alimentado por el auge de pseudociencias alternativas, antiguas o modernas, que parecen revestirles de una cierta legitimidad de la que científicamente carecen. No obstante, deben asumirse los propios errores, ya que la jerga técnico-científica del hidrogeólogo está alejada del pueblo llano, y generalmente los estudios hidrogeológicos son más caros que la pantomima de la varilla.

Herramientas que utiliza

Existen numerosas herramientas en hidrogeología, siendo muchas de ellas muy específicas para la obtención de datos. El hidrogeólogo desarrolla su trabajo en todos los medios por los que el agua circula: el atmosférico, la superficie, el suelo, la zona no saturada y el propio acuífero. Por ello, no es objeto de este apartado una enumeración de todas las herramientas, sino las más básicas y que se emplean con mayor habitualidad dentro de los estudios hidrogeológicos.

El IGME proporciona, desde su página web, la cartografía MAGNA 1:50.000 escaneada de manera gratuita con la memoria. No obstante, para ir al campo se sigue prefiriendo la hoja geológica de papel y guardada en la carpeta de plástico.

El inventario de puntos de agua consiste en un exhaustivo trabajo de recopilación en campo de los datos de una captación: situación, profundidad, columna litológica, medida de la profundidad del nivel piezométrico, caudal de bombeo, muestreo químico, determinaciones en campo, etc. Un profesional lo hace con rigor, charlando con el particular y aprovechando todo aquello que el recuerda: que material salía al perforar el sondeo y el profesional debe traducir términos locales como greda (marga), rodeno (conglomerado compacto) o piedra (caliza). El inventario también aprovecha la información existente en diversos organismos (IGME, Confederaciones hidrográficas, etc.) lo que permite optimizar el tiempo de campo y su planificación. La base de puntos de agua del IGME

(http://info.igme.es/BDAguas/) es una herramienta pionera que pone a disposición del usuario la información existente del inventario físico del IGME. No obstante, se tiende a emplear esta información y no realizar trabajo real de campo, con lo que no se actualizan datos.

Otra actividad relacionada con el medio ambiente es la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación de los acuíferos mediante la utilización de métodos hidrogeológicos, estadísticos, matemáticos o paramétricos, siendo estos los más utilizados por su relativa sencillez. Con los métodos paramétricos se obtienen índices numéricos y se estiman tanto la vulnerabilidad asociada al acuífero- vulnerabilidad intrínseca- como la condicionada por el tipo de contaminante – vulnerabilidad específica. Con estos índices se realizan mapas, recogiendo los intervalos en que la vulnerabilidad es muy baja, baja, moderada, alta o muy alta, con el fin de orientar al gestor de la ordenación del territorio. Es muy utilizado el denominado índice DRASTIC (donde es profundidad del nivel piezométrico (d), recarga del acuífero (r), naturaleza litológica del acuífero (a), suelo (s), gradiente topográfico (t), impacto de la zona vadosa (i) y permeabilidad del medio (c)). Otros métodos conocidos son el GOD, y específicamente para medios carbonatados, los denominados EPIK, RISK y COP, empleado para formaciones carbonatadas (Jiménez *et al*., 2009). Aunque parece una metodología objetiva, es el hidrogeólogo quien selecciona los valores que se dan, por lo que es preciso que sea un hidrogeólogo con experiencia quién elabore y emplee los índices. Esta metodología se utiliza para evaluar la contaminación difusa, principalmente la intrusión marina y el contenido en nitratos, pero también para el caso de vertederos y obras lineales como oleoductos. Su extensión e incidencia es preciso conocerla para realizar una adecuada planificación.

Para el estudio y determinación de niveles piezométricos el hidrogeólogo puede realizar un exhaustivo inventario y campañas periódicas de medidas de nivel piezométrico. La Administración Hidráulica también dispone de piezómetros construidos ex profeso para el control de los acuíferos. El conocimiento de qué equipos puede disponer el hidrogeólogo para efectuar su labor es fundamental: existen equipos de registro continuo de piezometría, conductividad, temperatura, de diversos iones, turbidez, pH; también hay muestreadores automáticos de agua, molinetes de agua para determinar caudales, etc. Esta monitorización de los acuíferos es fundamental para el conocimiento específico de los mismos. La comodidad y las prestaciones de estos equipos, permiten obtener niveles piezométricos, caudales y características fisico-químicas de las aguas de una manera continuada y ser almacenados y transmitidos hasta el PC del despacho.

Los modelos matemáticos representan conceptualmente un sistema geológico, empleándose tanto para apoyo a la gestión hídrica, en definición de perímetros de

protección o para la investigación. Se utilizan para determinar incógnitas en cuanto a piezometría, funcionamiento hidrodinámico, recarga, concentraciones químicas o temperatura. Se suele partir de una adecuada definición del sistema y posteriormente se calibra con series de datos reales, probando hasta que el modelo permita explicar dichas series. Los más empleados corresponden a los modelos matemáticos numéricos que utilizan como técnicas de resolución los elementos finitos o las diferencias finitas. Se puede modelizar el funcionamiento hidrodinámico de un acuífero, obteniendo por un lado los parámetros que más se adecuan a las series históricas de datos empleadas y luego se pueden hacer diversas hipótesis de funcionamiento, antes explotaciones intensas, sequías, etc. Igual pasa con los modelos de transporte, que pueden simular la evolución de contaminantes a partir de un foco puntual o difuso, permitiendo, los modelos de densidad variable, simular el comportamiento de unas intrusión marina. Sin embargo, el punto débil de la modelización son los datos de partida y, específicamente, la obtención de los parámetros hidráulicos necesarios que se ajusten a la realidad. Por ello es preciso que el hidrogeólogo modelista conozca físicamente el área estudiada o bien esté en contacto con el hidrogeólogo que ha obtenido y aportado los datos. El modelo matemático sobre simulación de flujos más conocido es el MODFLOW, creado por el USGS, siendo comercializado junto a los pre- y post-procesadores (Visual MODFLOW, Processing MODFLOW) para poder operar y obtener resultados con mayor facilidad. Como modelos de balance y estimación de la recarga se ha desarrollado el Visual BALAN, desarrollado por la Universidade da Coruña.

El estudio de la hidroquímica permite una mejor comprensión del funcionamiento de los acuíferos y de los procesos e influencias que sufre el agua que circula por los mismos. En la hidroquímica influyen tanto el propio medio litológico, en la zona saturada y no saturada, así como de las influencias antrópicas que son origen de procesos contaminantes. Las técnicas de estudio más empleadas son las diversas representaciones gráficas- las más habituales son los diagramas triangulares denominados de Piper-Hill-Langelier-, el estudio de relaciones entre iones o relaciones iónicas, su representación en mapas, o el empleo de modelación hidroquímica de transporte de solutos y conocer la evolución del quimismo de las aguas y la interacción roca-agua. Los programas más conocidos son el WATEQF y el PHREEQC. Para las determinaciones de los parámetros fisico-químicos en campo como el muestreo, se emplean conductivímetros, termómetros o phímetros de campo, así como tomamuestras para tomar muestras de agua a distintas profundidades. No obstante también se dispone de sondas multiparamétricas que permite realizar determinaciones continuas en tiempo de diversos parámetros, como, entre otros, conductividad, temperatura y con distintos sensores se puede determina la determinación de la calidad química (cloruros, nitratos, amonio, turbidez, clorofila, pH, O_2).

En los anteriores apartados ya se han descrito herramientas informáticas para su empleo en diversos estudios hidrogeológicos. En cuanto a su accesibilidad y gratuidad de las mencionadas herramientas informáticas, existen numerosas herramientas gratuitas internacionales y nacionales que el hidrogeólogo puede utilizar y que tienen una gran utilidad. Una de las principales páginas internacionales es la de la USGS (https://water.usgs.gov/software/lists/groundwater) aunque la interfaz de muchos de esos programas no son amigables. Específicamente, el MODFLOW, se dispone de Processing Modflow para Windows (PM-WIN) en versión académica (http://www.pmwin.net/pmwin5.htm). En el caso de las páginas nacionales, el Departamento del Ciclo Hídrico de la Diputación de Alicante ha sido pionero en cuanto a facilitar interesantes herramientas para la mayoría de los aspectos de la hidrogeología, son programas orientados hacia el diseño de nuevas instalaciones y la gestión del sistema de abastecimiento municipal, para la recarga natural de los acuíferos (RENATA), para la delimitación de perímetros de protección, para la elaboración de columnas litológicas de investigación de sondeos, para el tratamiento y gestión de series temporales hidrológicas y para la interpretación de ensayos de bombeo (PIBE), entre otros. (https://ciclohidrico.com/descargas/aplicaciones/).

El IGME, por su parte, también ofrece diversas aplicaciones en http://www.igme.es/productos_descargas/aplicaciones.htm, algunas desarrolladas en conjunto con la Diputación de Alicante, otras con las ETSIIM o propias, como la INGEOTAB, herramienta geológica para emplear en tablets en el campo.

Originados en Estados Unidos y Gran Bretaña, los Sistemas de Información Geográfica-SIG- permiten tener la información geográfica digitalizada y georreferenciada, relacionada con bases de datos externas que pueden contener toda la información referente a cada uno de los aspectos que interesen, independientemente de la fuente originaria de los datos. Funciona como capas temáticas que se pueden superponer y generar información nueva. Una de las ventajas del soporte informático es su relativa sencillez para mantenerla actualizada. Y la otra es la integración de los datos. También permite realizar mapas “a la carta” con fechas actualizadas: mapas de inventario, de piezometría, valores hidroquímicos, etc. Respecto a estos sistemas de información geográfica, además del reconocido ARCGIS, existen también herramientas gratuitas como del GV-SIG y el QGIS. Este último, trabaja en cualquiera de los sistemas operativos: GNU/Linux, BSD, Unix, Mac OSX, Windows y Android, funcionando de manera similar en todos ellos. Se actualiza de manera continuada y supone, para el hidrogeólogo consultor, una herramienta tremendamente útil al tratarse de software libre. En la actualidad se están desarrollando herramientas para el mismo, como el FREEWAT, que adapta diversos programas de modelación de flujo como el MODFLOW, etc. (http://www.freewat.eu/project).

La geofísica aplicada a la hidrogeología contempla dos aspectos distintos: la exploración

de los acuíferos sobre el terreno, con sus límites físicos o bien la testificación geofísica empleada tanto para conocer parámetros físicos (permeabilidad), calidad química de la aguas o comportamientos hidrodinámicos como para realizar una instalación adecuada del sondeo (situación correcta de filtros y rejillas) o el estado del sondeo.

El conocimiento de la hidrología isotópica permite, mediante el empleo de isótopos como trazadores naturales y/o artificiales, de determinar características hidráulicas (permeabilidad, dirección de flujo, tiempo de tránsito), pero también la existencia de filtraciones en presas y vertederos, el funcionamiento de los flujos en los sondeos, o la datación de las aguas y el establecimiento de diversas familias. Los isótopos también se emplean en la testificación geofísica de sondeos.

La cartografía hidrogeológica es una útil herramienta al gestor de recursos hídricos. Estos mapas contienen fundamentalmente información geológica e hidrológica, ocupándose no solo de fenómenos que acaecen sobre la superficie del terreno, sino también de aquellos que tienen lugar en el subsuelo. Existen diversos tipos de estos mapas atendiendo a diversos criterios como son la escala, los objetivos o el contenido. Según la escala se diferencian mapas a pequeña escala (<1:500.000), útiles para planificar futuros estudios de mayor detalle; mapas a escala media (1:500.000 a 1:100.000) generalmente documentos de síntesis hidrogeológica y mapas a gran escala (>1:100.000) que son el resultado de investigaciones específicas. Atendiendo a los objetivos se diferencian mapas hidrogeológicos generales o con fines especiales, que incluyen elementos hidrológicos individuales (concentración de un determinado ión, el uso del agua, etc.). Por último, según el contenido, los mapas pueden ser de movimiento del agua, de caracteres físico-químicos del agua y de posibilidades de explotación.

¿Con qué profesionales se relaciona?

Como se ha descrito en apartados anteriores, la definición de hidrogeólogo no lleva pareja una titulación universitaria única, sino que muchos profesionales hidrogeólogos comparten trabajo con otros de distinta titulación, como geólogos, biólogos, ingenieros, químicos, licenciados en ciencias ambientales, farmacéuticos, ingenieros técnicos y un largo etcétera.

Condicionado por el tipo de trabajo que se realiza, el hidrogeólogo puede relacionarse con profesionales ajenos a la hidrogeología; así, para estudios de impacto ambiental puede relacionarse con ingenieros de caminos, técnicos de obras públicas o licenciados en Derecho, igualmente puede ocurrir con trabajos relacionados con contaminación de las aguas, vertidos y estudios regionales. Ello se acentúa más si el estudio es demandado por la Administración. Sin embargo, si el trabajo es sobre patrimonio hidrogeológico, se

puede trabajar con arqueólogos e historiadores.

¿Quiénes son sus principales clientes?

La amplia oferta de campos relacionados con las aguas subterráneas que estudian los hidrogeólogos permite tener entre sus clientes a un amplio espectro de la sociedad, desde las diversas administraciones (local, autonómica y estatal) a empresas y particulares, en temas relacionados principalmente con la gestión y planificación hidrológica, la protección, la consultoría y la captación de aguas subterráneas.

Referencias bibliográficas

Jiménez, A., Carrasco, F. y Martínez, C. (2009). Análisis comparativo de la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos carbonáticos (Sierra de Cañete, provincia de Málaga). Boletín Geológico y Minero, 120 (1). 81-94.

López Geta, J.A. (2000). Contribuciones del Instituto al conocimiento y protección de las aguas subterráneas en España. En: Custodio, E.; Huerga, A. (eds.): Ciento cincuenta años (1849-1999). Estudio e investigación en ciencias de la Tierra.

Martínez, M. y Moreno, L. (2004). Propuesta de catálogo de puntos singulares del Patrimonio Hidrogeológico de la Región de Murcia. Geotemas, 6(4). 123-126.

Mijailov, L. (1985). Hidrogeología. Ed. Mir. 285 pp

Voss, C. (ed.) (2005). The future of hydrogeology. Hydrogeology Journal, v.13, nº 1. Ed. Springer.

Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P., McGlynn, B., Hrman, C., Gupta, H., Kumar, P., Rao, S., Basu, N. y Wilson, J. (2010). The future of hydrology: An evolving science for a changing world. Water Resources Research, v. 46, W05301, doi:10.1029/2009WR008906.

El geólogo geofísico

Enrique Aracil Ávila
Profesor del Dpto. de Geodinámica
Estratigrafía y Paleontología de la UCM

La geofísica es una ciencia que se dedica al estudio de la estructura física y las propiedades de la Tierra. Podría decirse que la geofísica es una rama común de la geología y la física. Comparte con la primera la búsqueda del conocimiento de las características de la Tierra y, con la segunda, la aplicación de métodos, técnicas y principios para la investigación de las características bajo superficie. Una de sus ramas, la prospección geofísica, a la aplicación de diferentes técnicas para el conocimiento de las propiedades físicas del subsuelo. En términos muy generales, el geólogo se sirve de la prospección geofísica para investigar indirectamente el subsuelo, es decir, todo lo que se encuentra por debajo de la superficie y, consecuentemente, está oculto.

Qué utilidad tiene la prospección geofísica

Por medio de la prospección geofísica se determinan, a partir de distintos aparatos, diferentes propiedades físicas y físico-químicas del subsuelo. El análisis de esas propiedades, la cuantificación de sus valores, la observación de la distribución de éstos, así como de la presencia o no de anomalías constituye, en conjunto, la investigación geofísica del subsuelo. Para poder “traducir” ese conjunto de valores físicos o físico-químicos a un modelo geológico será necesario contar con información geológica de contraste que, una vez integrada con los resultados geofísicos, permita conocer cómo es el subsuelo.

El geólogo geofísico se vale de su formación geológica y de sus conocimientos de las propiedades físicas y físico-químicas de los materiales para poder hacer esa "traducción" anteriormente comentada con el criterio geológicamente más coherente. En este sentido, se podría decir que tiene una ventaja sobre el resto de especialistas en geofísica (físicos, ingenieros de minas) ya que su formación geológica es bastante mayor, lo que se traduce en una mayor facilidad y coherencia geológica a la hora de interpretar los resultados geofísicos obtenidos en una determinada campaña. Probablemente, la base que tiene el geólogo geofísico sobre conocimientos físicos sea menor que la de los técnicos anteriormente citados pero queda compensada con creces esta ligera deficiencia por esa mayor capacidad de interpretar los resultados desde un punto de vista más geológico.

A la vista de lo aquí expuesto, la prospección geofísica sensu stricto sirve para tener conocimientos sobre las características físicas de los materiales que forman el subsuelo y sobre las formas de análisis e interpretación de los resultados obtenidos tras el estudio de las diferentes propiedades de esos materiales. La prospección geofísica aplicada, como su propio nombre indica, no es más que la aplicación de la geofísica y los métodos geofísicos para realizar una prospección del subsuelo de una zona determinada.

El trabajo que realiza

El geólogo geofísico realiza un trabajo que se considera de gran interés por dos motivos principales: Por un lado, porque con su trabajo contribuye a la investigación de lo que está oculto y, por otro, porque su aportación es muy útil para numerosos especialistas en la materia, es decir, que tiene una contribución multidisciplinar.

Una vez realizadas estas dos indicaciones que permiten evaluar de forma muy generalista el trabajo del geólogo-geofísico, conviene concretar el tipo de tareas que lleva a cabo para poder conocer mejor su labor técnica y científica. El grueso de este trabajo consiste en la implantación de diferentes dispositivos sobre el terreno para, una vez obtenidas las lecturas pertinentes, procesar la información de estos datos e interpretarlos con el fin de aportar algo de "luz" al "oscuro" ambiente que es el subsuelo. Pero, como antes se ha indicado, esto es solamente una de las etapas, la correspondiente a la adquisición y procesado que, ni mucho menos, se presentan de forma aislada sino acompañada de otras etapas. En mayor o menor medida, todas ellas contribuyen al trabajo final del geólogo geofísico y todas ellas son importantes.

Ordenadas de forma cronológica todas estas etapas, quedarían relacionadas de la siguiente manera:

1. Obtención de información sobre la zona de trabajo.
2. Identificación del objetivo perseguido para seleccionar el método geofísico más adecuado.
3. Realización de la campaña de adquisición de datos del subsuelo.
4. Procesado de los datos registrados.
5. Integración de toda la información e interpretación de los resultados.
6. Redacción del informe final.

Información sobre la zona de trabajo. Esta fase constituye, lógicamente, la primera de todas y es aquélla en la que el geólogo geofísico indaga en las "bases de datos" de un área determinada con el propósito de obtener un primer conocimiento de las características de la zona donde se tiene que realizar el trabajo. Estas características que deben conocerse son muy variadas y podrían diferenciarse en características de tipo logístico y de tipo geológico.

Desde el punto de vista logístico, el geólogo geofísico no deberá descuidar nunca la labor de reconocimiento general de la zona que pretende investigar, es decir, conocer si hay accesos y cómo son; ver si el terreno es abrupto o es practicable; ver si hay vegetación que impida el emplazamiento de los dispositivos o si esta vegetación es lo suficientemente dispersa como para poder transitar entre ella.

Desde el punto de vista geológico, el geólogo geofísico tiene un trabajo muy importante: intentar conocer cuáles son los principales rasgos geológicos de la zona de estudio ya que es muy importante saber en qué rango de profundidades se encuentra el objetivo, si existe fracturación u otra serie de aspectos que deban tenerse en consideración a la hora de plantear los dispositivos, como es la dirección preferente de esa fracturación así como de la estratificación y del plegamiento. Para ello, deberá hacerse una recopilación de la documentación existente lo más exhaustiva posible. Esta fase puede llevar un cierto tiempo pero no cabe duda que la información que es capaz de aportar va a ayudar tanto que la duración de esta primera etapa no deberá preocupar si se extiende mucho. Lógicamente, una vez recopilado todo lo necesario deberá realizarse un análisis de toda esa información.

Selección del método geofísico. Consiste en la selección del método o de los métodos geofísicos que se consideran más adecuados para cubrir el objetivo. Lo más lógico y habitual es que esta fase de trabajo se pueda realizar pero, en numerosas ocasiones, el método prospectivo viene solicitado por el cliente lo cual implica una ventaja y un inconveniente. La ventaja se debe a que no hay que dedicar tiempo a esta fase pues ya viene cubierta por el cliente al ser éste el que propone o solicita directamente el tipo de investigación que desea para cubrir el objetivo. El inconveniente, sin embargo, radica en la dificultad o imposibilidad de cambiar el método solicitado por otro método geofísico

distinto que se acomode mejor a las necesidades del objetivo o a las características de la zona de trabajo.

En cualquier caso, es conveniente que el geólogo geofísico analice las características del objetivo perseguido y determine cuál es el método o los métodos más adecuados para alcanzarlo, bien por el tipo de objetivo, bien por la profundidad a la que se espera encontrarlo o bien por las dimensiones del mismo o, incluso, por el presupuesto disponible para abordar los trabajos.

Campaña de adquisición de datos. Esta etapa podría considerarse como la de mayor importancia al ser el momento en el cual el geólogo geofísico procede a la obtención de los datos de campo que, tras su procesado, permitirá informar acerca de las características del subsuelo. Para la realización de esta campaña, el geólogo geofísico deberá realizar una serie de tareas complementarias, como es el caso a veces de la solicitud y gestión de los permisos necesarios para poder realizar los trabajos en la zona de estudio. Aunque simplemente sean permisos de paso, en numerosas ocasiones el geólogo tiene que notificar su intención de hacer una serie de trabajos para evitar prohibiciones de ejecución de medidas que, con los equipos desplazados e, incluso, los dispositivos implantados en el terreno, a veces el geofísico se ve obligado a acatar. Si se trata de propiedades privadas, tendrá que comentar las intenciones con el propietario; si son públicas, con el Ayuntamiento implicado. Si se trata de pasar o atravesar carreteras, en ocasiones deberá notificarlo al Ayuntamiento, a la Diputación o a la Comunidad Autónoma pertinentes. En definitiva, las gestiones administrativas no se escapan del ámbito de trabajo de un geólogo geofísico.

Otra de las etapas complementarias, pero que también hay que realizar de forma previa a los trabajos de adquisición de datos, es el desbroce de la maleza que, a veces de forma muy densa, cubre las zonas por donde hay que realizar las medidas, para lo cual habrá que realizar la apertura de vías de paso con las dimensiones suficientes como para permitir el paso del personal y los equipos.

La tercera actividad que el geólogo geofísico tiene que ser consciente que deberá realizar de manera complementaria es la señalización de los trabajos realizados en campo. Si bien actualmente hay una serie de herramientas que facilitan esta labor, muchas veces es recomendable, además, señalizar las medidas realizadas (puntos de medida, comienzos y finales de perfiles, etc.) directamente en el terreno, como es el caso de las marcas con pintura reflectante y biodegradable, así como con cinta de obra. Las herramientas anteriormente indicadas que facilitan la señalización de la situación de los trabajos son, por ejemplo, los equipos portátiles receptores de señal GPS para obtención de las coordenadas más o menos exactas de los puntos medidos. También es posible indicarlo

en mapas de diferentes escalas y, lo que suele ser más interesante, en fotografías aéreas.

La señalización lo más exhaustiva posible de la posición de los trabajos realizados es, por tanto, labor fundamental del geofísico, en tanto que unos buenos datos y unos buenos resultados carecerían de valor si no se encuentran referenciados correctamente.

Por lo que respecta a la medición de datos en campo propiamente dicha, que es lo que constituye la actividad principal del geólogo geofísico en esta fase del estudio, habría que destacar una serie de facetas importantes como son la calibración de los aparatos, la implantación de los dispositivos, la medición y la comprobación. Es lógico pensar que, para obtener buenas medidas en campo, es decir, medidas coherentes y reales, los aparatos de registro deberán estar calibrados, actividad esta que deberá hacerse de forma regular con el fin de mantener los sensores acordes con las prescripciones técnicas del fabricante.

Con los equipos calibrados, la actividad siguiente es la implantación de los dispositivos, es decir, situar sobre el terreno el aparato emisor, el receptor y los sensores de medida. Para ello, la base geológica del geólogo geofísico es fundamental para determinar las características geológicas del terreno y condicionar, con ello, la disposición sobre el terreno según un criterio geológicamente correcto, que deberá primar siempre sobre el criterio topográficamente más cómodo, ya que hay numerosas ocasiones en que lo geológicamente correcto es incompatible con lo topográficamente deseable. Los cambios bruscos de pendiente, los escarpes, los bancales, etc., son ejemplos de terrenos que deben evitarse para no introducir posibles elementos de error en los programas de procesado. Según estas indicaciones, el geólogo geofísico deberá tener siempre bien claro cuáles son las limitaciones de cada método, las circunstancias óptimas de cada dispositivo y las características de cada terreno y de cada objetivo con el fin de analizar, a veces directamente en campo, cómo realizar esa implantación de aparatos, cables y sensores.

Procesado de los datos. En esta etapa, el geólogo geofísico suele llevar un ordenador portátil al campo con el fin de realizar un primer procesado y comprobar, en una primera inspección, si los datos registrados son de buena calidad o han sufrido alteraciones de algún tipo que hayan causado la obtención de ficheros aparentemente erróneos. En este caso, este primer procesado consiste, realmente, en una revisión de la calidad de los datos geofísicos obtenidos. Una vez confirmado que los ficheros son aceptables, el geólogo geofísico los archivará para su posterior tratamiento en gabinete en lo que constituye el procesado final.

Este procesado requiere la aplicación de diferentes programas informáticos (en la actualidad resulta impensable la actividad manual de procesado de datos, fase que antiguamente llevaba mucho tiempo por la necesidad de comparar los datos con tablas,

gráficos, estadillos, etc.). Estos programas suelen ser específicos de cada aparato o, en ocasiones, de aplicación más generalista. En cualquier caso, el geólogo geofísico será conocedor de estos programas con el fin de poder sacar el máximo provecho de los datos obtenidos.

Integración de toda la información e interpretación de los resultados. Hasta esta fase podría decirse que las actividades desarrolladas pueden ser llevadas a cabo de forma aproximadamente equivalente por diversos colectivos, pero esta fase que se describe en este punto es ya de vital importancia que sea realizada o, cuando menos supervisada, por el geólogo geofísico. La razón es que una labor de integración de toda la información existente del subsuelo para alcanzar la mejor interpretación geológica posible de los resultados parece lógico pensar que debe hacerse con una fuerte base de conocimientos de geología.

El geólogo geofísico deberá "echar el resto" en esta fase, que es primordial para llevar a cabo la "transformación" de los datos puramente físicos obtenidos en resultados geológicos, considerando que las variaciones que observe en los datos procesados pueden deberse a cuestiones geológicas como es el caso de los posibles cambios laterales de facies, variaciones de espesor por la situación dentro de la cuenca sedimentaria, la existencia de discordancias angulares y progresivas, etc.

Redacción del informe final. La labor de la redacción del informe final no debe ser considerada como la menos importante pues el geólogo geofísico deberá tener la suficiente soltura como para poder expresar cuáles han sido los trabajos realizados, describir la metodología empleada, desarrollar el capítulo correspondiente a los resultados obtenidos y expresar de forma clara y concisa las conclusiones a las que se ha llegado para poder establecer las pertinentes recomendaciones.

Todo esto en sí parece una obviedad pero es importante que el geólogo geofísico haga un esfuerzo por cuidar tanto la redacción como la presentación de los resultados. Para comprender y valorar estas indicaciones basta con no olvidar que la redacción del informe final constituye la exposición de todo el trabajo realizado en las fases anteriores.

Entre todo este conjunto de actividades que desarrolla el geólogo geofísico sería injusto no incluir otra labor que desarrolla en mayor o menor medida y es la actividad comercial. Es el técnico que mejor conoce lo que hace, cómo lo hace y para qué lo hace y, por tanto, es el técnico que mejor podrá "vender" su producto. La prospección geofísica goza de un buen concepto por muchos profesionales pero, al mismo tiempo, padece un desconocimiento, una "mala fama" e, incluso, un desprecio por parte de muchos. Es una tarea de gran importancia dar a conocer la existencia de la prospección geofísica y las

posibilidades que ofrece así como sus ventajas e inconvenientes.

Los conocimientos que aporta

La actividad que es capaz de desarrollar el geólogo geofísico aporta una información de gran importancia para el geólogo, ya que se trata de una información muy variada y diversa sobre el subsuelo, que procede de prospecciones muy diferentes, y es justo la que necesita para complementar los datos que obtiene éste en los trabajos que realiza en superficie.

Pero para que el geofísico pueda aportar esta información de gran ayuda para el geólogo necesita que esta ayuda sea mutua. Conviene recordar que la prospección geofísica es una herramienta que se vale de la geología para poder interpretar los datos con mayor precisión y, consecuentemente, facilitar resultados más concluyentes. Un simple corte geoeléctrico o un radargrama no aportan conclusiones tan resolutivas si no van acompañados de una interpretación desde el punto de vista geológico.

No obstante, aunque la situación más conveniente es el análisis de la información geológica de una zona conjuntamente con la información obtenida tras una campaña de prospección geofísica, la aportación de información “a ciegas” por parte del geólogo geofísico suele ser un método habitual, bien porque no existe información previa o bien porque no se dispone de ella.

Sin embargo, se puede exponer un tercer escenario y es precisamente el que resulta más perjudicial ya que todavía está muy extendida la idea de que debe ser el geofísico el que aporte la información sin “ayuda externa de la que pueda valerse para manejar los resultados a su conveniencia”. El calificativo perjudicial lo es en tanto en cuanto se trata de un trabajo entre profesionales lo cual presupone seriedad y honradez en la investigación.

De un modo u otro, la aportación de conocimientos suele ser importante, tanto si es a escala regional como si es a escala más local. A partir de estudios regionales (como los realizados a partir de campañas de gravimetría, magnetismo, sísmica de reflexión, así como prospección eléctrica y electromagnética) el geólogo geofísico es capaz de aportar conocimientos, por ejemplo, acerca de la estructura que afecta y compartimenta una cuenca sedimentaria ya que se puede obtener un reflejo bastante fiel de disposición de las unidades geológicas, de la distribución de sus espesores, de la localización del depocentro, de la estructuración de la misma, etc. Lógicamente, para ello es importante disponer de un conocimiento previo de los posibles espesores y naturaleza de las unidades geológicas que rellenan esa cuenca para poder ofrecer una información mucho más completa. Las técnicas más resolutivas (como puede ser, por ejemplo, el caso de la sísmica de reflexión)

permiten ver, incluso, términos evolutivos desde el punto de vista geológico ya que se pueden llegar a identificar secuencias sedimentarias, *system-tracks*, etc.

También, a partir de sus estudios realizados a escala tanto regional como local se puede llegar a determinar la presencia o no de fracturas, las características que las definen (anchura, desarrollo, contenido o no en agua, etc.), sus direcciones preferentes e inclinaciones y la posible compartimentación de una zona en bloques hundidos y elevados.

Tanto la información estratigráfica-sedimentológica como la información estructural son de gran ayuda para la hidrogeología ya que los conocimientos que aporta el geólogo geofísico no sólo facilitan la identificación acerca de la presencia, el espesor y la profundidad de posibles acuíferos sino también pueden aportar información sobre la calidad de sus aguas (es decir, si éstas pueden estar afectadas por la presencia de contaminación, por efecto de la salinización, etc.).

A una escala más reducida, por ejemplo, se puede determinar con mayor precisión la posición de planos de fractura, la profundidad estimada en el subsuelo de un determinado nivel de interés, la localización de sectores karstificados, etc. Ya a una escala más local, técnicas de prospección eléctrica y electromagnética son capaces de definir la trayectoria de canalizaciones o delimitar la extensión de una “pluma” de contaminación en el suelo o la identificación de “fugas” en una balsa o en un vertedero o la posición de una cavidad.

Herramientas que utiliza

Para alcanzar ese conocimiento de las características del subsuelo, el geólogo geofísico se sirve de una instrumentación variada tanto en cuanto a la técnica como en cuanto al diseño, la complejidad y la sofisticación. Pero para que la interpretación se aproxime lo más posible a la realidad, el geofísico deberá combinar los datos que le aporte esa instrumentación con tres herramientas muy particulares: la lógica, la experiencia y la prudencia. En cuanto a la lógica pues es una “herramienta” de constante utilización por los geólogos; por lo que respecta a la experiencia, para aplicar en todo momento la técnica geofísica más adecuada para cubrir el objetivo perseguido y hacer la mejor interpretación posible de los resultados. Por último, deberá emplear la prudencia a la hora de hacer esa interpretación de los resultados.

El conjunto de instrumentos que utiliza el geólogo geofísico es muy variable (resistivímetros, gravímetros, sismógrafos, etc.), en tanto que son muy diversas las propiedades físico-químicas que se analizan (diferencias en comportamiento eléctrico, diferencias de masa-densidad).

Al existir variaciones importantes en el comportamiento eléctrico de los materiales

del subsuelo, se emplean resistivímetros para control de la resistividad, es decir, de la propiedad que indica la mayor o menor capacidad de los materiales para conducir la corriente eléctrica a su través. Estos resistivímetros, en su origen, eran aparatos manuales pero en los últimos años se han dejado, como no podía ser de otra manera, "contagiar" de los avances tecnológicos e informáticos y los fabricantes ofrecen desde entonces equipos totalmente digitales, con las consabidas ventajas que ofrece esta mejora en la tecnología. El empleo de resistivímetros se lleva a cabo para campañas de prospección geoeléctrica mediante sondeos eléctricos verticales o perfiles de tomografía eléctrica, por ejemplo.

También, el geólogo geofísico emplea equipos que se basan en el principio del electromagnetismo para determinar las propiedades eléctricas de los materiales del subsuelo. Estos equipos los emplea, por ejemplo, cuando se trata de campañas de sondeos electromagnéticos o campañas de prospección con geo-rádar.

Los equipos sísmicos que utiliza el geólogo geofísico se basan en la medición de la velocidad de propagación de ondas sísmicas (o acústicas) en el subsuelo, tanto las que son refractadas en los contactos entre capas diferentes (sísmica de refracción) como las que son reflejadas en los mismos (sísmica de reflexión) como las ondas superficiales (MASW activa y pasiva). Esta velocidad está condicionada, fundamentalmente, por la composición, el grado de compactación y la densidad de la roca.

Propiedades parecidas a estas últimas descritas son en las que se basa el método gravimétrico para el estudio de la estructura de una cuenca como para la búsqueda de cavidades (microgravimetría). Para ello se sirve de otro aparato, el gravímetro, que es capaz de medir diferencias de atracción gravitatoria de una masa conocida que se encuentra alojada de forma estanca en su interior.

Del mismo modo que se ha descrito para estos métodos geofísicos, existen otros aparatos de constante uso por el geólogo geofísico que se basan en otras propiedades de los materiales del subsuelo para analizarlos. Tal es el caso del magnetómetro (para hacer campañas de magnetometría), el VLF (para hacer campañas mediante ondas de muy baja frecuencia, *very low frecuency*), etc.

Con qué profesionales se relaciona

El geólogo geofísico se relaciona con un gran número de profesionales que se encuentran vinculados, con mayor o menor intensidad, al terreno. Así, desde los paleontólogos y prehistoriadores hasta los arquitectos pasando por ingenieros de caminos y de minas, todos encuentran un lugar común en la geofísica. Quizás esta afirmación necesite de una aclaración para su mejor comprensión y, al mismo tiempo, para ver el alcance de estas

relaciones multidisciplinares.

Para un geólogo estructural, por ejemplo, es muy importante conocer la estructura de una cuenca y de un macizo rocoso, el plegamiento y disposición de las capas, así como la presencia y orientación de fracturas. Pues bien, todos estos aspectos son, con mayor o menor precisión, detectables e interpretables por el geólogo geofísico a partir de los perfiles y mapas que puede generar con los datos geofísicos.

Del mismo modo que el conocimiento de la estructura de una cuenca es fundamental para el estructuralista, llegar a saber cómo es el relleno de esa cuenca, dónde está el depocentro, cómo son los materiales que la rellenan, cómo se distribuyen, de qué manera se distribuyen las facies, son incógnitas de necesaria resolución para un sedimentólogo y que son perfectamente abordables por distintos métodos geofísicos.

¿No le ayudaría mucho a un hidrogeólogo conocer dónde se encuentra el nivel freático, o dónde hay niveles permeables, a qué profundidad y en qué posición se pueden encontrar los niveles y las fracturas productivas, hasta dónde se extiende la cuña de intrusión marina? Sin duda, la relación entre este profesional y el geólogo geofísico sería muy productiva. Los conocimientos que puede aportar el geólogo geofísico en esta materia, como ya se ha visto en capítulos anteriores, son casi innumerables.

La minería, como dedicación del geólogo, del ingeniero de minas y del profesional, tampoco se aparta del ámbito de actividad del geólogo geofísico. Hay una serie de métodos geofísicos que tienen una directa aplicación a la prospección mineral. No debe olvidarse que la prospección geofísica surgió para dar cobertura y apoyo a la investigación de recursos energéticos (hidrocarburos) y minerales. Dentro de este campo están también las canteras, tanto de materiales destinados a áridos como a explotación como roca ornamental. Conocer hasta dónde extienden en profundidad, ver sus variaciones laterales, calcular sus reservas son objetivos de constante persecución por el geólogo geofísico.

¿No tiene un edificio un substrato rocoso sobre el que edificarse? ¿No suele haber cavidades, zonas alteradas o fracturas en ese substrato? ¿No hay que realizar una excavación para los niveles subterráneos? ¿No hay que poner apoyos constructivos sobre el terreno? ¿No hay edificios que sufren hundimientos? Cada vez es más frecuente encontrar sentados en una misma mesa de reuniones geólogos geofísicos y arquitectos para tratar de buscar soluciones a los problemas que se le plantean a éstos. Del mismo modo, es cada vez más frecuente el reconocimiento de la ayuda que puede aportar el geólogo geofísico tanto a los ingenieros de caminos, canales y puertos como a los ingenieros técnicos de obras públicas. La caracterización de apoyos de frentes de presas, la predicción de los terrenos y fracturas a atravesar por un túnel, el diseño de la

excavabilidad en una obra lineal y la resolución de problemas en puertos marítimos son incógnitas abordables por los geólogos geofísicos.

Una de las principales incógnitas que desea resolver un especialista en medio ambiente es la identificación de terrenos contaminados y la localización de la extensión de la "pluma" de contaminación. La legislación actual relacionada con suelos contaminados obliga al propietario de un terreno a descontaminarlo; conocer con anterioridad a un proceso de compraventa de fincas, solares y parcelas y si éstas están o no contaminadas evitará sorpresas desagradables al futuro comprador. Estos objetivos son, igualmente, abordables a partir de técnicas geofísicas y, por tanto, constituyen un campo en el que el geólogo geofísico tiene mucho que decir.

Aunque pudiera parecer extraño, también la policía y los jueces han necesitado en alguna ocasión del geólogo geofísico. Hay una serie de casos en los que se ha contado con la colaboración del geólogo geofísico tanto para su resolución (por ejemplo, para la búsqueda de montañeros bajo la nieve de avalanchas) como para dictaminar una sentencia.

¿Quiénes son sus principales clientes?

Los clientes para los que trabaja el geólogo geofísico son muy variados ya que van desde organismos públicos hasta particulares, pasando por empresas privadas. El caso de los organismos públicos de carácter nacional, como puede ser el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), se convierten en clientes potenciales en tanto que pueden (y suelen) solicitar el apoyo tecnológico de geólogos geofísicos en proyectos de investigación de determinadas zonas. También sucede lo mismo cuando se trata de ministerios, como por ejemplo, el Ministerio de Fomento, con cuyos presupuestos se costean los proyectos de infraestructuras de ámbito nacional (como es el caso de las redes de carreteras, autovías y autopistas, los trazados de las líneas férreas y de líneas de alta velocidad, etc.). En el caso del Ministerio de Medio Ambiente suceden situaciones similares cuando, por ejemplo y por enmarcarlo en una situación muy actual, se puede colaborar en la parte correspondiente de los programas nacionales de diseño y construcción de las redes piezométricas de las cuencas hidrográficas. Dentro de este ámbito estatal destacan asimismo las Confederaciones Hidrográficas, las cuales pueden convertirse en clientes potenciales, por ejemplo, con la colaboración con medios geofísicos dentro de los programas nacionales de los programas nacionales de diseño y construcción de las redes piezométricas, o para temas relacionados con los embalses para regadío.

También el geólogo geofísico puede contar con clientes como las administraciones autonómicas, es decir, diversas consejerías, como es el caso, por ejemplo, de las

correspondientes consejerías de Agricultura (para participar en proyectos de investigación hidrogeológica para localizar recursos en el subsuelo capaces de paliar las necesidades de regadío de una comarca determinada); o de las correspondientes consejerías de Medio Ambiente (colaborando en proyectos de investigación para control de la extensión de la contaminación de suelos y de acuíferos); o de las correspondientes consejerías de Fomento (como sucedería en el caso de la participación en proyectos de infraestructuras).

A una escala más próxima, también son clientes potenciales las diputaciones provinciales, que tienen competencias en la mayoría de los municipios de cada provincia y, consecuentemente, se sirven de los conocimientos de los geólogos geofísicos para integrarlos en proyectos de emergencia en periodos de sequía para investigar nuevos acuíferos en zonas poco explotadas o con necesidad de recursos. Lo mismo sucede en las colaboraciones para apoyo a problemas geotécnicos que afecten a determinadas infraestructuras o a la construcción de nuevas redes de abastecimiento así como a la participación en las primeras fases del diseño de vertederos o el control de posibles fugas de los mismos.

Ya en el grado de mayor cercanía, los organismos públicos locales, como los ayuntamientos, suelen requerir, habitualmente, los servicios de geólogos geofísicos, por ejemplo, en los proyectos de captación de aguas subterráneas.

Lo mismo sucede con universidades y con centros de investigación, como podría ser el caso del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) que se convierten en clientes potenciales cuando el geólogo geofísico, o su empresa, se convierten en socios tecnológicos de proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica (I+D+i).

En cuanto a las empresas privadas, la diversificación de clientes es enorme en tanto que los objetivos que son abordables a partir de la prospección geofísica son muy variados. Los sectores del tejido empresarial susceptible de necesitar los servicios del geólogo geofísico son diversos como también es cambiante el orden de prioridad de esos clientes: dependiendo del momento, se presentan como prioritarios los proyectos para control y resolución de los efectos de una sequía prolongada (desaladoras, trasvases), o los proyectos de infraestructuras estratégicas (carreteras, líneas ferroviarias de alta velocidad, cementerios radiactivos), proyectos medioambientales (descontaminación de suelos, control de intrusión marina, vertederos), construcción (geotecnia, obra civil, búsqueda de recursos, como los áridos o la roca ornamental), etc. Son precisamente esos momentos en los que las consultoras y las empresas de ingeniería, así como las empresas del ramo de la construcción o las empresas extractivas de áridos y compañías fabricantes de cemento, por ejemplo, canalizan una parte de sus presupuestos y, consecuentemente, se convierten en los principales clientes para el geólogo geofísico.

Referencias bibliográficas

Por lo que respecta a las referencias bibliográficas de las que se nutre el geólogo geofísico, como sucede en casi la totalidad de las disciplinas técnicas y científicas, son publicaciones extranjeras y apenas hay textos traducidos al castellano.

Aracil, E. (1995). Testificación geofísica: Una herramienta para la inspección de sondeos hidrogeológicos. VI Simposio de Hidrogeología. Sevilla.

Aracil, E. (2000). Inspección, control de calidad, envejecimiento y regeneración de pozos. Olmo, M. y López-Geta, J. A. (eds.). Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología, IGME, Madrid, 49-59.

Aracil, E. (sin publicar). Registros geofísicos. Aspectos aplicados. Nuevas técnicas de construcción de pozos en terrenos no consolidados. Fermín Villarroya. Editorial de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español.

Astier, J. L. (1975). Geofísica Aplicada a la Hidrogeología. Paraninfo, Madrid.

Beck. A. E. (1991). Physical Principles of Exploration Methods. (2ª ed.). Wuerz, Winnepeg.

Bengt Sjöre (1984). Shallow Refraction Seismics. Champman and Hall, Londres.

Blakely, R. J. (1995). Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press.

Bullen, K. E. (1985). An introduction to the theory of seismology. (3ª ed.). Cambridge University Press, Nueva York.

Cantos Figuerola, J. (1987). Tratado de prospección geofísica aplicada. (3ª ed.). Escuela Superior de Minas, Madrid.

Chuvieco Salinero, E. (1996). Fundamentos de teledetección espacial. (3ª ed.). Ediciones Rialp, Madrid.

Dobrin, M. (1960). Geophysical Prospecting. MacGraw-Hill, Nueva York.

Estrada Lorenzo, F. (1996). Prospección geofísica de alta resolución mediante georádar aplicación a obras Civiles. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX Madrid. Ministerio

de Fomento.

Garland, L. D. (1965). Introduction to Geophysics. Mantle, core and crust. (2ª ed.), Sanders, Filadelfia.

Grant, F. S. y West, G. F. (1965). Interpretation theory in applied geophysics. McGraw- Hill, Nueva York.

Griffiths, D. H. y King, R. F. (1972). Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos (traducción y notas de Angel Río de la Cruz). Paraninfo, Madrid.

Griffiths, D. H. y King, R. F. (1981). Applied geophysics for geologists and engineers: the elements of geophysical prospecting. (2ª ed.), Pergamon Press, Oxford.

Gupta, Ravi P. (1991). Remote sensing geology. Springer, Berlín, Barcelona.

Hatton, L., Worthington, M. H. y Makin, J. (1986). Seismic Data Processing. Blackwell Science.

Kearey P. y Brooks, M. (1991). An Introduction to Geophysical Exploration. (2ª ed.) Blackwell Science.

Lille, R. J. (1999). Whole Earth Geophysics. Prentice Hall, Nueva Jersey.

Lorenzo, E. (1996). Prospección Geofísica de Alta Resolución mediante georádar. Cedex, Madrid.

Lowrie, W. (1997). Fundamentals of geophysics. Cambridge University Press.

Miguel, L. de (1980). Geomagnetismo. (3ª ed.). Instituto Geográfico Nacional, Madrid.

Milson, M. (1991). Field Geophysics. Geological Society of London Handbook. John Wiley & Sons, Nueva York.

Mirónov, V. S. (1977). Curso de prospección gravimétrica. Reverté, Barcelona.

Officer, C. B. (1974). Introduction to theoretical geophysics. Springer, Nueva York.

Orellana, E. (1974). Prospección Geoeléctrica por Corriente Continua y Campos

Variables. Paraninfo, Madrid.

Parasnis, D. S. (1970). Principios de geofísica aplicada. Paraninfo, Madrid.

Plata, J. L., Alonso, T., Alberdi, R. y Aracil, E. (1996). Testificación geofísica de sondeos mecánicos: divulgación y desarrollo metodológico de esta técnica. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.

Reynolds, J. M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley & Sons, Nueva York.

Rodríguez Santana, Á. y Marrero Díaz, Á. (sin publicar). Problemas de Geofísica propuestos, resueltos y comentados. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Sharma, P. R. (1997). Environmental and engineering geophysics. Cambridge University Press.

Sleep, N. H. y Fuyita, K. (1997). Principles of Geophysics. Blackwell Science.

Smith, P. J. (1975). Temas de Geofísica. Reverté, Barcelona.

Shearer, P. M. (1999). Introduction to Seismology. Cambridge University Press.

Serra, O. (1985). “Diagraphies Differees”. Bull Cent. Rich. Explorer. -Prod. Elf-Aquitaine.

Society of Exploration Geophysicists of Japan (2014). Application Manual of Geophysical Methods to Engineering and Environmental Problems.

Telford, W. M.; Geldart, L. P. y Sheriff, R. E. (1990). Applied Geophysics. Cambridge University Press.

Trigueros Tornero, E. (1993). Introducción a la investigación y prospección minera. Universidad de Murcia.

Udías Vallina, A. y Mezcua Rodríguez, J. (1997). Fundamentos de geofísica. Alianza, Madrid

El geólogo marino

Teresa Medialdea y Luis Somoza
Instituto Geológico y Minero de España

La Geología Marina es una rama relativamente reciente de la Geología cuyo objetivo es el estudio de los márgenes continentales y cuencas oceánicas profundas. La importancia de la geológica marina queda patente si tenemos en cuenta que los mares y océanos cubren dos tercios de la superficie terrestre. Es por ello que esta especialidad resulta clave para entender y estudiar la evolución de la Tierra, la vida y los procesos ambientales, sin olvidar la riqueza y el gran valor e interés económico de los recursos marinos no vivos. Los geólogos marinos son profesionales que han adquirido los conocimientos, metodologías y herramientas de trabajo necesarias para la exploración, investigación y estudio del fondo y subsuelo marino en los actuales márgenes continentales y cuencas oceánicas.

No existe hasta el momento ninguna titulación universitaria específica en Geología Marina que se imparta en las Universidades españolas, aunque para formar personal especializado en esta temática algunas universidades han incorporado materias en sus planes de estudio. La especialización de los geólogos en Geología Marina se lleva a cabo en los centros de trabajo (organismos oficiales y empresas) y a través de los másteres y programas de doctorado que ofrecen las universidades. La Geología Marina forma parte también de los planes de estudio, masters y programas de doctorado de las Facultades de Ciencias del Mar (Universidad de Cádiz y Vigo), destinados a la formación multidisciplinar de profesionales en cualquier ámbito o temática relacionada con el medio marino y litoral. Los principales impulsores de estudios de geología marina son las administraciones públicas (ministerios, comunidades autónomas, organismos públicos de investigación),

aunque también las empresas realizan estudios aplicados de gran interés.

La Geología Marina y sus aportaciones al conocimiento de la Tierra

El desarrollo de la Geología Marina desde sus inicios en el siglo XVIII ha estado limitado por una serie de factores como: la inaccesibilidad del medio, la falta de puntos de referencia y la necesidad de recurrir a diferentes métodos y técnicas, a veces muy complejas, específicamente desarrolladas para el estudio del medio marino, lo que ha originado un importante retraso en su inicio y desarrollo. Los comienzos de la geología marina puede decirse que tienen lugar con las primeras expediciones científicas para la exploración de los océanos en el siglo XIX, entre las que cabe mencionar las expediciones a bordo del HMS "Beagle" (1831–1836) alrededor del mundo, en la que participó Charles Darwin, del HMS "Challenger" (1872–1876) en la que se estableció por primera vez la morfología de los fondos oceánicos profundos y los tipos de sedimentos que lo cubrían y del RV "Meteor" en el océano Atlántico (1925–1927), en la que se localizó y definió la morfología de la dorsal mesoceánica utilizando por primera vez un nuevo descubrimiento: las sondas batimétricas. Sin embargo, el desarrollo de la Geología Marina tuvo lugar fundamentalmente durante la segunda mitad del siglo XX tras la Segunda Guerra Mundial (1945). La investigación marina con fines militares supuso un gran impulso en el desarrollo de la geofísica marina. Las técnicas para localizar los submarinos y otros objetos sumergidos, basados en métodos acústicos y las perturbaciones del campo magnético, llevó a la construcción de importantes instrumentos de prospección geofísica marina, como magnetómetros de gran sensibilidad e hidrófonos. En los años 40 el uso de testigos de pistón permitió la obtención de forma rutinaria de secciones de sedimentos, produciéndose un gran impulso en el conocimiento de los depósitos del fondo marino, y en la paleoceanografía. Un segundo gran avance en la geología marina se produjo a partir de los años 60-70 como respuesta a la demanda creciente de petróleo y gas, que resultó en el desarrollo ininterrumpido de equipos de adquisición y procesado de datos sísmicos para la búsqueda de estos recursos. Más recientemente, los submarinos autónomos (AUVs en sus siglas en inglés "*Autonomous Underwater Vehicule*") o robots conectados por cable a un barco y controlados a distancia por un operador (ROVs en sus siglas en inglés "*Remotely Operated Vehicule*"), han introducido grandes cambios en la metodología de exploración de pequeñas áreas de los fondos oceánicos. Con estos equipos se puede realizar batimetrías, fotografiar y filmar videos de alta resolución hasta los 6000-7000 m de profundidad, tomar muestras de sedimento y roca, así como muestras biológicas y de agua.

En síntesis, a lo largo de las últimas décadas la mejora en los equipos ha permitido no solo ampliar la exploración a las regiones más profundas, sino también aumentar progresivamente la resolución. Actualmente el 100% de los fondos oceánicos mundiales

ha sido explorado con una resolución de 5 km. Para resoluciones de alrededor de 100 m (es decir, no es posible reconocer rasgos menores de 100 m), la cobertura se reduce drásticamente, ya que alcanza sólo un 10-15% (Copley, 2014).

El desarrollo de la geología marina ha estado también estrechamente relacionado con otros dos factores: la disponibilidad de barcos oceanográficos específicos para las observaciones, que se produjo a mediados del siglo pasado y el desarrollo de los sistemas de posicionamiento mediante satélites, que permiten la realización de observaciones localizadas con precisión y que han cambiado radicalmente las metodologías de exploración permitiendo además, la realización de estudios en aguas profundas, lejos de la costa, con precisión.

Finalmente, cabe señalar que uno de los grandes impulsos que ha recibido la geología marina y que ha condicionado de manera notable el conocimiento de los océanos ha sido la fundación a lo largo del siglo XX de instituciones dedicadas exclusivamente a la oceanografía y el desarrollo de programas internacionales que han promovido la cooperación internacional en numerosas expediciones así como la investigación multidisciplinar. Ente ellos cabe señalar el Deep Sea Drilling Project (1966-1983, http://deepseadrilling.org), que continuó con el Ocean Drilling Program (1983-2003, www-odp.tamu.edu), el Integrated Ocean Drilling Program (2003-2013, https://www.iodp.org) y el International Ocean Discovery Program (2013-actualidad), así como el Programa Interridge (desde 1992 hasta la actualidad, https://www.interridge.org), centrado en las dorsales oceánicas.

Hasta los años cincuenta, nuestro conocimiento de la Tierra estaba basado fundamentalmente en los estudios realizados en las áreas continentales. A pesar del retraso en el inicio del desarrollo de la Geología Marina y las dificultades técnicas y logísticas que plantean este tipo de estudios, la exploración de los océanos ha producido una transformación radical en el conocimiento de la naturaleza de los fondos marinos y los procesos geológicos, lo que ha constituido una revolución en nuestro conocimiento sobre la Tierra y su evolución.

Pocos ejemplos ilustran mejor la importancia de los investigación geológica marina que los estudios geofísicos llevados a cabo en los años 50 y 60, que jugaron un papel crucial en el establecimiento de la teoría de la tectónica de placas, desarrollada a partir de las ideas sobre la deriva continental propuestas por Wegener (1966), cambiando nuestra forma de pensar sobre cómo habían evolucionado los continentes y los océanos. Una de las evidencias críticas que apoyan la tectónica de placas deriva del reconocimiento y origen de las lineaciones de anomalías magnéticas en los océanos (Vine and Matthews, 1963), así como la distribución de terremotos en los bordes de las placas. El desarrollo de la Geología Marina no solo ha contribuido de forma significativa al avance de la geología,

sino que además ha dado lugar al desarrollo de nuevas metodologías de trabajo. Un ejemplo son los nuevos conceptos basados en el análisis de los perfiles sísmicos en los márgenes continentales, que han revolucionado el análisis de cuencas y que constituyen la Estratigrafía sísmica y secuencial. El progresivo perfeccionamiento de las técnicas de obtención e interpretación de perfiles sísmicos, y la adquisición masiva de perfiles en diferentes contextos geológicos, condujo al desarrollo de esta nueva metodología que culminó con la publicación en 1977 del libro "Seismic Stratigraphy" (Payton, 1977), que marcó un hito en la historia de la Estratigrafía y de la Geología Marina. En este libro, Vail *et al*. (1977) desarrollaron el concepto de estratigrafía secuencial como una valiosa herramienta para la correlación estratigráfica de las unidades sedimentarias en las imágenes sísmicas.

El trabajo que realiza

En España, la labor que desempeñan los geólogos marinos sigue siendo poco conocida, a pesar de que desde los años 80 el número de profesionales ha crecido progresivamente de manera notable. La imagen que tiene la sociedad del geólogo marino está influenciada muchas veces por los documentales que ofrece la televisión y que ofrecen a veces una visión algo idealizada de las tareas que desempeñen estos profesionales, aunque su trabajo cotidiano frecuentemente se aleja de esta realidad.

Los geólogos marinos estudian diversos aspectos del medio marino: la geomorfología, los procesos sedimentarios y sistemas deposicionales, la paleoceanografía, la tectónica y evolución geodinámica de los márgenes continentales y cuencas oceánicas, las emisiones de fluidos, los riesgos geológicos submarinos (deslizamientos, terremotos y tsunamis, volcanes, etc.) y los recursos naturales (áridos, depósitos minerales, gas, petróleo, hidratos de gas).

El trabajo del geólogo lleva implícito el trabajo en barcos oceanográficos donde se realiza la adquisición de datos (Fig. 1). La realización de campañas oceanográficas supone un elevado coste económico y personal técnico muy especializado, así como una planificación previa exhaustiva (selección de equipos que se utilizarán de acuerdo a los objetivos fijados, transporte de equipos y técnicos, estimación de fungibles y equipos complementarios e informáticos, seguros, etc.). La duración de estas campañas es muy variable, desde días a un mes, que es la cifra más habitual actualmente para las campañas de investigación. Para la exploración en aguas profundas, se utilizan grandes buques en los que los trabajos se desarrollan generalmente en turnos que cubren las 24 horas, en los que participan especialistas en los diferentes tipos de equipos de adquisición y procesado de datos. Aunque se trata de equipos multidisciplinares, debe señalarse que el trabajo del geólogo marino requiere una formación amplia, dadas las diferentes técnicas e instrumentos que va a utilizar en una campaña y la necesidad de enfrentarse a

problemas muy variados. Por ello es importante que el geólogo conozca las posibilidades y limitaciones de las diferentes técnicas que utiliza y los últimos avances técnicos, así como las posibilidades que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica.

Fig. 1. Buques oceanográficos “Hespérides”, “Miguel Oliver” y “Sarmiento de Gamboa”.

El trabajo se desarrolla fundamentalmente en la administración pública y en la empresa privada. En el primer caso el geólogo marino se localiza en organismos autónomos y centros de investigación como el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), el Instituto Español de Oceanografía (IEO), el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) o en la Universidad, así como en algunas instituciones de comunidades autónomas. En estos casos el trabajo se centra generalmente en la exploración e investigación a través de proyectos financiados por los propios organismos, los ministerios competentes y la Comisión Europea y en la docencia. Actualmente, las principales líneas de investigación en España se orientan a: estudios de procesos sedimentarios y sistemas deposicionales, paleoceanografía, tectónica y evolución geodinámica de márgenes continentales y cuencas oceánicas, riesgos geológicos submarinos, mineralizaciones y modelización de procesos geológicos en los océanos. En organismos como el IGME, se desarrollan además proyectos de infraestructura centrados fundamentalmente en cartografía geológica, análisis de riesgos submarinos, recursos minerales y elaboración de bases de datos marinas de acceso público, sin olvidar el asesoramiento técnico a otros ministerios y organismos. La preocupación creciente por el medio ambiente marino ha generado numerosos planes

e inversiones actualmente en desarrollo. En los últimos años el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y Medio Ambiente, a través de la Fundación Biodiversidad está realizando numerosos proyectos encaminados a la protección del medio marino, entre los que debe mencionarse aquellos dirigidos a extender la Red Natura 2000. Con esta finalidad se han estudiado 10 grandes áreas marinas de las regiones atlántica, mediterránea y macaronésica, con el objetivo de evaluar, caracterizar y proponer su designación como Lugares de Importancia Comunitaria (LIC) de la Red Natura 2000.

En la empresa privada el geólogo marino forma parte de la plantilla de empresas consultoras o como profesional autónomo, generalmente, atendiendo a la elaboración de asesorías, informes y estudios locales. En este caso se trata generalmente de empresas de ingeniería civil, de minería, del medio ambiente y del petróleo. Los sectores principales de ocupación en estas empresas son:

- Cartografía geológica.
- Realización de campañas oceanográficas. Elaboración de batimetrías y prospección geofísica.
- Evaluación y prevención de riesgos geológicos (sismicidad, erupciones volcánicas, deslizamientos).
- Estudios geológicos para obra civil: regeneración de playas y proyectos de infraestructuras (puertos, tendido de cables, gasoductos, construcción de emisarios submarinos, instalación de plataformas petrolíferas).
- Investigación y prospección de recursos naturales (áridos, depósitos minerales y energéticos).
- Gestión y análisis de impactos medioambientales para evaluar la incidencia y vulnerabilidad del medio marino.

Entre las líneas de trabajo mencionadas, debe resaltarse en el ámbito de los recursos energéticos, la importancia de las tareas que desempeña el geólogo marino en la exploración y explotación de los yacimientos de gas y petróleo. Así mismo hay que destacar, el trabajo de los profesionales de la geología en la zona litoral y en aguas someras de la plataforma continental, donde pueden participar en la realización de diversas obras de infraestructura y ayudar a la preservación de la costa, evitando daños irrecuperables. Es en esta zona donde se producen las principales actuaciones antrópicas, como son modificaciones de la deriva litoral por la construcción de diques y espigones, extracciones de arenas para la regeneración de playas, construcción de emisarios submarinos, etc.

Herramientas que utiliza

El desarrollo de cualquier trabajo en el medio marino impone la utilización

de herramientas muy específicas y generalmente diferentes de las que se usan en tierra, como son los barcos oceanográficos, los sistemas de posicionamiento que permitan referenciar los datos que se obtengan y los métodos de adquisición de datos directos e indirectos, con un predominio de éstos últimos.

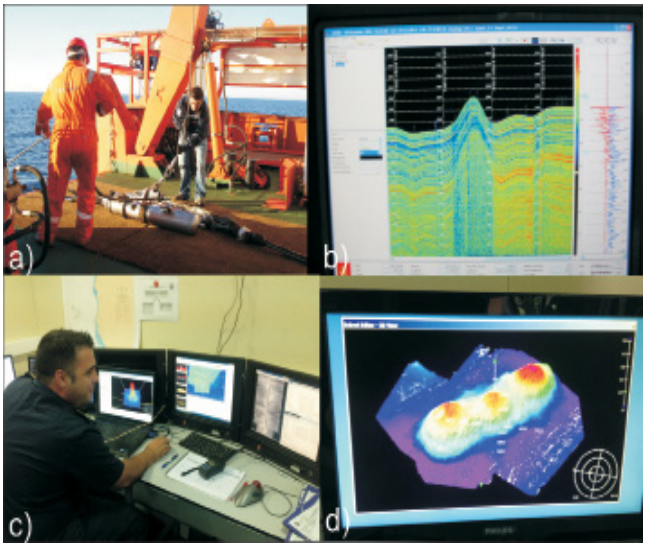

Fig. 2. Sistemas de exploración geofísica utilizados en Geología Marina: a) Cañones de aire como fuente sísmica; b) Perfil sísmico de alta resolución; c) Sonda multihaz (procesado) y d) Modelo 3D batimétrico de volcanes en la Antártida.

En todas las campañas oceanográficas de Geología Marina es imprescindible la utilización de sistemas de posicionamiento por satélite para determinar la localización exacta de los datos adquiridos. La utilización de estos sistemas suele ir acompañado de programas informáticos de navegación, que permiten visualizar en tiempo real la situación del barco, la programación de los trabajos y almacenar la localización de los datos. Debe tenerse en cuenta que además de la situación del barco, a veces es necesario conocer la posición de los sensores, especialmente cuando trabajamos en zonas profundas, para ello se cuenta con instrumentos específicos instalados en el sensor. Junto con los programas de navegación se utilizan Sistemas de Información Geográfica, que se han convertido en una herramienta prácticamente indispensable. Estos programas permiten trabajar, analizar y modelizar información referenciada.

Entre los métodos de prospección geofísica destacan los métodos sísmicos, por su extendido uso y por su aplicación en la cartografía, prospección de recursos (gas e hidrocarburos) y en la ingeniería civil. En el mar constituyen una herramienta insustituible que se encuentra en continuo desarrollo. En función de una serie de factores tales como la frecuencia empleada, los métodos de obtención de la energía

acústica y los sistemas de recepción, se han desarrollado distintos sistemas que cubren toda la gama de resoluciones y penetraciones. Para el estudio de la superficie del fondo marino se utilizan ecosondas y sonar de barrido lateral. Las ecosondas suministran un método rápido, continuo y preciso de obtener medidas de profundidad. Existe una gran variedad de ecosondas, aunque desde hace unos años las más utilizadas son las sondas multihaz que permiten que el buque reconozca de una sola pasada amplias zonas del fondo marino. De esta forma se pueden obtener tras el procesado de los datos, mapas batimétricos de gran detalle y modelos digitales del terreno. Actualmente, no se concibe realizar una campaña oceanográfica sin una base cartográfica realizada con ecosonda multihaz para la obtención de los datos de profundidad y reflectividad del fondo marino. De la misma forma, los sonar de barrido lateral permiten la obtención de sonografías del fondo marino con una cobertura al 100%, análogas a fotos aéreas en una banda de anchura variable (de metros hasta unas decenas de km) a ambos lados del barco. Los registros obtenidos con el Sonar de Barrido Lateral aportan desde el punto de vista geológico una detallada información sobre la morfología y naturaleza del fondo en función de su reflectividad.

Un segundo grupo de sistemas sísmicos son aquellos que penetran en el subsuelo en diverso grado. En este caso, los datos obtenidos son visualizados en secciones sísmicas. La elección del sistema variará de acuerdo con los objetivos, la profundidad, la zona de trabajo (plataforma, talud, llanura abisal), la escala, así como una serie de consideraciones técnicas. En función del poder de penetración y la resolución existen diferentes sistemas y equipos de adquisición de datos sísmicos. Entre los sistemas de alta resolución/baja penetración (alrededor de unos 20 m bajo el fondo), se encuentran los perfiladores de sedimentos y las sondas paramétricas. Frecuentemente estos sistemas se utilizan simultáneamente con otros equipos que permiten una penetración media-alta (hasta unos 1000 m) con una relativa buena resolución, con el fin de optimizar la adquisición de datos sísmicos. Los sistemas de alta resolución resultan muy útiles para la planificación de las campañas de muestreo del fondo marino. En áreas profundas y para alcanzar grandes penetraciones se utiliza sísmica multicanal, desarrollada por las compañías petrolíferas, que aunque en principio era exclusivamente utilizada por éstas, desde hace unas décadas su uso se ha extendido ampliamente a trabajos de investigación y otras aplicaciones. Actualmente, es habitual el uso de otras herramientas muy específicas como son programas para la adquisición y procesado (filtrado de frecuencias, aplicación de filtros de oleaje, etc.) de datos sísmicos y para la interpretación. Estos programas están orientados a la interpretación de perfiles en pantalla, elaboración de distintos mapas y modelos en 3 dimensiones, integración de los datos interpretados con datos de sondeos, mapas batimétricos, etc. Frecuentemente, y en función de los objetivos de los proyectos, las técnicas de prospección sísmica se complementan con la obtención de datos mediante gravímetros, magnetómetros y sondas de flujo de calor.

El muestreo de rocas y sedimentos del fondo es un elemento indispensable para determinar la composición y naturaleza de los materiales que conforman el lecho marino, mediante la observación directa y de otros análisis de laboratorio que se realizan posteriormente y que pueden informar sobre su composición, granulometría, contenido en carbonatos, edad, génesis, etc. Atendiendo a la localización, profundidad, naturaleza del fondo y los objetivos del muestreo, existen diferentes métodos y equipos (Fig. 3). Así para la extracción de rocas y materiales consolidados del fondo, se utilizan dragas de arrastre y testigos de roca, mientras que para la obtención de testigos continuos de la parte superficial del subsuelo marino, se utilizan testigos de gravedad y de pistón y vibrocores. Al igual que ocurre con las campañas de prospección geofísica, a lo largo de una campaña es frecuente la utilización de diferentes técnicas de muestreo. Además de la toma de muestras es interesante contar también con la información de sondeos profundos, tanto los realizados generalmente para la exploración de gas y petróleo, como los llevados a cabo con fines científicos dentro de los diferentes programas internacionales existentes. En algunos casos también se toman muestras mediante buceo, en las zonas someras situadas fuera del límite de navegación de los barcos oceanográficos convencionales o mediante vehículos autónomos a profundidades de hasta 6000 metros.

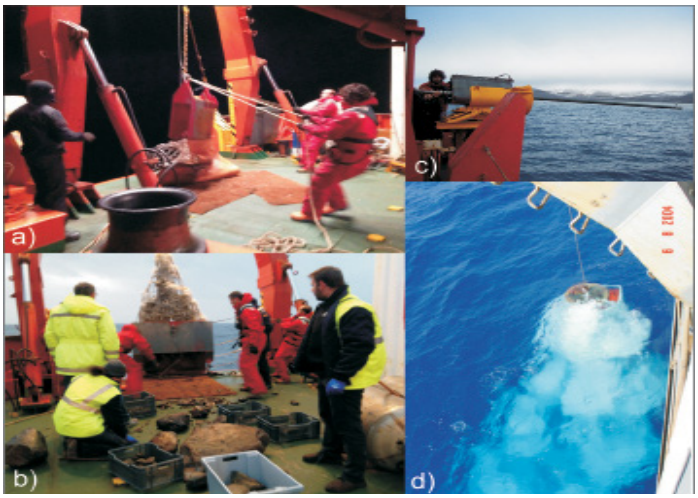

Fig. 3. Sistemas de muestreo: a) Draga de roca a bordo del “Hespérides” en la Antártida; b) muestras de roca; c) Testigo de gravedad para toma muestras de sedimento continuo; d) Ascenso de una draga con sedimentos ricos en hidratos de metano, en la que se observa la desgasificación producida.

Actualmente, las observaciones y muestreos de los fondos marinos se realizan con ROVs (acrónimo del inglés “*Remotely Operated Vehicule*”), que permiten operar hasta profundidades de 6000 metros (Fig. 4). Los ROVs permiten no solo obtener videos de

alta resolución, sino también realizar muestreos puntuales tanto de sedimentos como de roca. Asimismo, los ROVs permiten conocer valores continuos de los contenidos en gases como CO_2 o metano en el agua mediante uso de sensores. Otra nueva tecnología usada en geología marina son los AUVs (acrónimo del inglés "A*utonomous Underwater Vehicles*") que son vehículos submarinos que, a diferencia de los ROVs, carecen de cordón umbilical con el buque. Los AUVs pueden ir equipados con sonda multihaz, sonar de barrido lateral y multi-sensores, permitiendo realizar cartografías de los fondos marinos con resoluciones horizontales de centímetros. Actualmente, existen prototipos de escuadrones de AUVs y barcazas autónomas no tripuladas equipadas con sondas multihaz desplegadas y operadas a distancia desde un buque nodriza. Este sistema permitirá en un futuro próximo realizar cartografías de los fondos marinos que cubrirán extensas áreas con alta resolución.

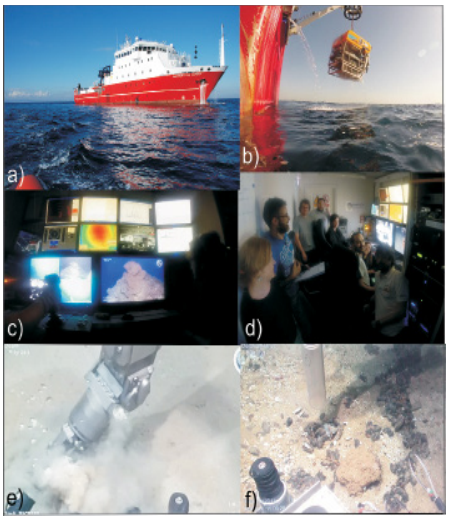

Figura 4. Sistema de buque oceanográfico-ROV: a) Buque oceanográfico Sarmiento de Gamboa; b) ROV 6000 Luso con capacidad para inmersión hasta 6000 m; c) Consola del ROV; d) Piloto y copiloto del ROV durante las operaciones de muestreo en la campaña SUBVENT-2; e) Brazo articulado del ROV mostrando burbujeo del fondo marino relacionado con la desestabilización de hidratos de metano; f) Muestreo de sedimentos sobre "mejillones" quimiosintéticos a más de 1000 m de profundidad asociados a emisiones naturales de hidrocarburos.

Algunos ejemplos de estudios de Geología Marina

Estudios de vertidos submarinos: el caso del hundimiento del petrolero "*Prestige*"

Los riesgos generados por hundimiento de barcos y posibles vertidos de hidrocarburos u otros contaminantes sobre los fondos marinos es uno de los campos potenciales de actuación de la geología marina. Un ejemplo fue el estudio geológico de la zona donde se hundió el petrolero *Prestige* el 19 de noviembre de 2002, ocasionando un vertido de

crudo que provocó uno de los mayores desastres ecológicos de la historia de España (Fig. 5).

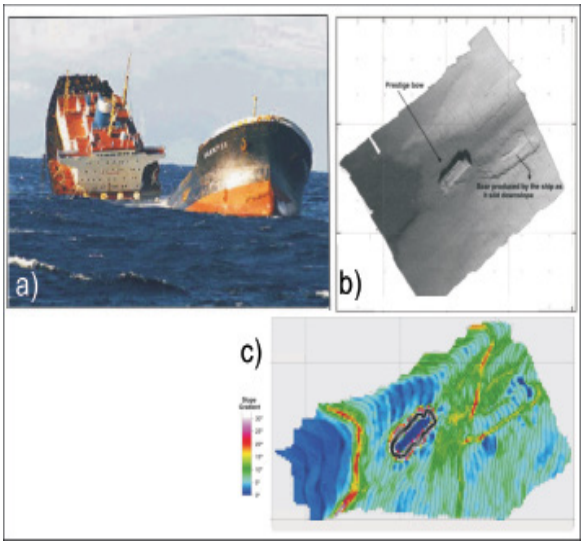

Fig.5 a) Hundimiento del petrolero Prestige b) Imagen de la proa del barco sobre el fondo del mar obtenida con sonar de barrido lateral, en la que se puede apreciar como deslizó pendiente abajo una vez tocó fondo; c) Mapa de pendientes en la zona de la proa identificándose taludes superiores a 200.

Los dos fragmentos en que quedó dividido el petrolero Prestige se localizaron a 3565 m de la profundidad (popa) y 3830 m (proa), en el flanco sudoeste del banco de Galicia. La zona de hundimiento, situada en el talud continental con una morfología muy irregular y pendientes elevadas, obligaron “a priori” a considerarla como una zona de riesgo medio-alto por su idoneidad para que se produjeran procesos gravitativos que pudieran afectar a los pecios y dar lugar a una reactivación de los vertidos. Los estudios geológicos realizados consistieron en la caracterización morfológica detallada de la zona de los pecios mediante sonar de barrido lateral y sonda multihaz, así como la detección mediante el análisis de testigos de sedimentos de posibles vertidos en los fondos marinos. Las imágenes de sonda de barrido lateral y de multihaz mostraron que la proa del Prestige se deslizó ligeramente por el flanco del margen.

De la experiencia adquirida en el estudio del hundimiento del Prestige, los estudios de geología marina sobre potenciales vertidos contaminantes submarinos deben orientarse a dos objetivos. El primero sería el conocimiento del entorno morfológico, tectónico y sedimentario del pecio, de cara a identificar riesgos asociados como deslizamientos submarinos, terremotos y corrientes de fondo que pudieran reactivar los vertidos. El segundo objetivo consistiría en detectar el grado de influencia de los vertidos sobre los sedimentos en la zona circundante a los pecios o fuente del vertido.

Para ello, la cartografía realizada con sistema hidroacústicos debe combinarse con los estudios geoquímicos de los sedimentos tomados con testigos.

De esta forma, los principales estudios de geología marina sobre vertidos marinos son los siguientes: realización de cartografía morfológica y de reflectividad del fondo marino; estudios acústico-sísmicos de alta resolución de los sedimentos del fondo marino y reconocimiento de la arquitectura sedimentaria reciente (ondas de arena, canales, etc.); estudio de la estructuras tectónicas recientes y la sismicidad; identificación de deslizamientos submarinos y estudio sedimentológico y geoquímico, propiedades físicas y geotécnicas de los sedimentos.

Riesgo volcánico submarino: el caso de la erupción de El Hierro

Uno de los casos más significativos de riesgo volcánico en España ha sido la erupción submarina de El Hierro localizada al sur de la isla (Fig. 6). La erupción comenzó el día 10 de octubre de 2011 frente a la localidad costera de La Restinga después de una intensa actividad sísmica en la isla de El Hierro, y se prolongó hasta 2012. Como consecuencia de la actividad volcánica, aparecieron flotando en primer lugar las denominadas “restingolitas” y posteriormente numerosos balones de lava incandescentes. La navegación y las actividades recreativas y de buceo quedaron prohibidas. Dado el incremento progresivo de la actividad eruptiva y ante el riesgo de aumento de explosividad del volcán, se procedió a la evacuación temporal de la población de La Restinga. Las actuaciones que se realizaron en El Hierro se coordinaron a través del Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por riesgo volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias (PEVOLCA).

Una de las actuaciones principales requeridas por el PEVOLCA para el estudio de la erupción submarina fue la de conocer la profundidad y dimensiones del nuevo volcán submarino. Estos estudios se llevaron a cabo por buques oceanográficos como “Ramón Margalef” y “Sarmiento de Gamboa” dotados con sonda multihaz y que periódicamente realizaron la cartografía en 3D para controlar el crecimiento y/o colapso del nuevo volcán submarino. El conocimiento de la profundidad de la cima del volcán submarino en una emergencia de este tipo es esencial, puesto que el riesgo de explosividad se incrementa teóricamente cuanto más cerca se encuentre la emisión volcánica de la superficie del agua. Los estudios de cartografía multihaz se acompañaron de imágenes acústicas de la columna de agua, dado que la pluma eruptiva procedente de la emisión enmascara la señal de fondo. Los estudios sistemáticos basados en técnicas hidroacústicas durante una erupción submarina son imprescindibles dado que permiten conocer la evolución del volcán y asesorar a los organismos de protección civil de cara a posibles riesgos para la población.

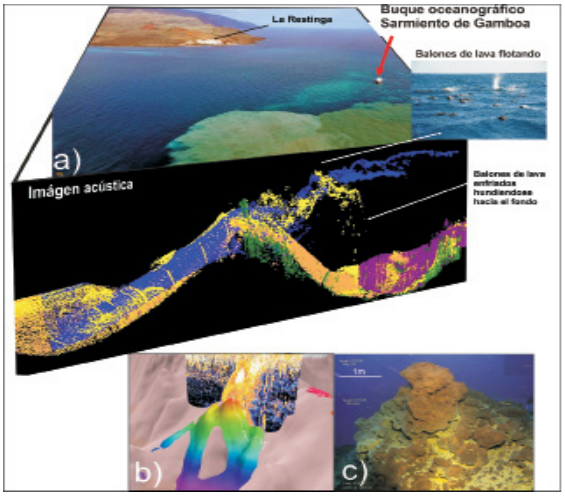

Fig. 6 a) Imagen hidroacústica de la pluma volcánica obtenida durante la campaña GAIRE a bordo del buque oceanográfico Sarmiento de Gamboa; b) Imagen combinada 3D del volcán obtenida con batimetría multihaz y de la emisión de la pluma volcánica en la columna de agua obtenida con ecosondas de alta frecuencia: c) Imagen de la cima del volcán submarino del El Hierro.

Ampliación de la jurisdicción de los Estados sobre los recursos geológicos submarinos

La Convención de Derecho del Mar de las Naciones Unidas (UNCLOS en sus siglas en inglés "*United Nation Convention for the Law of the Sea*"), más conocida como la Constitución del Mar, regula entre otros aspectos los límites de las zonas marítimas junto con los derechos de soberanía de los países ribereños sobre los recursos geológicos de estas zonas (Fig. 7): Mar Territorial (hasta las 12 millas náuticas), Zona Económica Exclusiva (ZEE, hasta las 200 millas náuticas), Plataforma Continental (hasta más allá de las 350 millas náuticas) y la Zona (fondos de aguas internacionales más allá de la Plataforma Continental).

El límite entre las aguas jurisdiccionales e internacionales más allá de las 200 millas náuticas puede ser trazado por un Estado basándose en una serie de datos científicos de su Plataforma Continental que ha de presentar ante una comisión científica-técnica de Naciones Unidas. La soberanía sobre los recursos geológicos hasta el límite exterior de la Plataforma Continental ampliada corresponde a los Estados, mientras que los recursos más allá, en la denominada Zona, son considerados como patrimonio de la Humanidad y está regulada por la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos (AIFM en español o ISA en sus siglas en inglés "*International Seabed Authority*") con sede en Kinsgton (Jamaica).

Conforme a este proceso, muchos de los reservorios de petróleo, gases convencionales

y gases hidratados del subsuelo marino, así como de nódulos y costras polimetálicos pueden pasar a estar bajo la jurisdicción de muchos países ribereños. Dadas las implicaciones económicas de este proceso, en las últimas décadas se ha producido un aumento exponencial de los estudios científicos de los océanos de todo el mundo. Hasta el momento se han presentado más de 77 propuestas de ampliación de diferentes países ante Naciones Unidas.

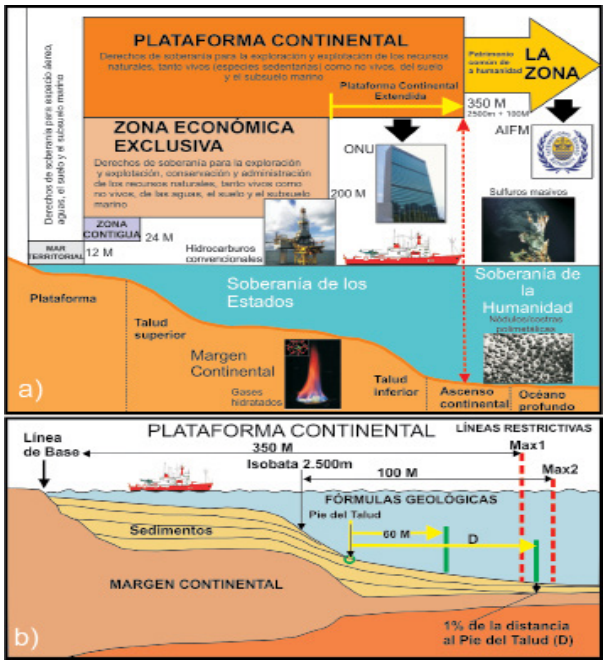

Fig.7 a) Límites de las zonas marítimas conforme a la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar junto con los derechos de soberanía de los países ribereños sobre los recursos geológicos de estas zonas; b) Reglas geológicas para la ampliación de la Plataforma Continental más allá de las 200 millas náuticas.

En virtud del artículo 76 de la Convención, todos los Estados pueden ampliar la Plataforma Continental más allá de las 200 millas náuticas, siempre que se aporte la suficiente documentación geológica que apoye el cumplimiento de las reglas establecidas en la Convención para la definición de su límite exterior y la normativa desarrollada por la Comisión de Límites de la Plataforma Continental de Naciones Unidas. En este sentido hay dos reglas para ampliar donde se aplican los estudios geológicos. La primera regla denominada de la “distancia” permite ampliar 60 millas náuticas a partir del pie del talud continental. La segunda regla establecida en el artículo 76 y conocida como del “1%” permite a los Estados ampliar hasta un punto, a partir del pie de talud, donde el espesor de rocas sedimentarias sea igual o mayor al 1% de la distancia hasta ese punto. Es decir, un punto con un espesor de 1 km de rocas sedimentarias permite ampliar hasta 100

km desde el pie del talud continental. Para ello, se han de realizar estudios de geología marina con sonda multihaz y equipos de sísmica multicanal con el fin de analizar la fisiografía y caracterizar el margen continental, así como calcular los puntos de máximo espesor de rocas sedimentarias mediante la interpretación de perfiles sísmicos. Toda esta documentación geológica, cartografía de los fondos, perfiles sísmicos, etc. en formato digital se incorpora a un Sistema de Información Geográfica (SIG) para su presentación ante la Comisión de Límites de la Plataforma Continental (CLPC en español o CLCS en sus siglas en inglés "*Commission on the Limits of the Continental Shelf*") de Naciones Unidas, responsable de examinar y aprobar, si lo considera pertinente, los límites externos de la plataforma continental propuestos por los diferentes países

Actualmente, numerosos geólogos marinos están trabajando en estos proyectos de ampliación de las plataformas continentales en todo el mundo. La mayoría de los Servicios Geológicos e institutos hidrográficos están o han estado recientemente involucrados en dicho proceso. Para más información se puede consultar la página web de la CLCS: http://www.un.org/depts/los/clcs_new/clcs_home.htm

Exploración de minerales estratégicos submarinos

La exploración de los recursos minerales bajo los océanos se encuentra en un proceso inicial y son necesarias importantes inversiones para el conocimiento de los recursos existentes, así como para desarrollar nuevas tecnologías para una futura explotación medio ambientalmente sostenible. Se estima que las mayores reservas de muchos de los metales estratégicos en la Tierra se encuentran en los fondos marinos. En este sentido, cabe señalar que las reservas conocidas del 96% del cobalto, el 84% del níquel o el 79% del manganeso se encuentran en los yacimientos submarinos. Por tanto, los recursos minerales submarinos pueden ser una fuente importante para el suministro de metales base y de alta tecnología como el cobalto, el telurio, el níquel, los metales nobles o las tierras raras en un mundo que los demanda de forma creciente. Los depósitos de óxidos de ferromanganeso de los fondos marinos, a pesar de estar escasamente explorados, ya representan la fuente más importante de elementos de alta tecnología del planeta, utilizados en móviles, ordenadores, baterías, etc.

Los depósitos submarinos están constituidos por una variedad de yacimientos entre los cuales los más importantes por tamaño y tonelaje son los de nódulos de manganeso, las costras de ferromanganeso con alto contenido en cobalto y los sulfuros polimetálicos submarinos. Además de estos yacimientos también se pueden encontrar depósitos submarinos de tipo placer (como los de oro, estaño o diamantes), fosforitas y evaporitas.

Desde la Convención sobre el Derecho del Mar del año 1982, la Autoridad Internacional de Fondos Marinos (http://www.isa.org.jm) ha firmado contratos por 15 años para la exploración de los depósitos de sulfuros, nódulos y costras polimetálicas con veintitrés consorcios de diferentes países hasta el año 2015, sobre 2.2 millones de km2 en los fondos de los océanos Atlántico, Pacífico e Índico. De estos contratos, catorce son para la exploración de nódulos de manganeso: trece en la zona de fractura de Clarion-Clipperton y uno en la Cuenca del Índico Central. En relación a los sulfuros polimetálicos, hay concedidos cinco contratos de exploración en el dorsal de la India y en la dorsal atlántica, mientras que los contratos de costras con altos contenidos en cobalto, se han concedido en el Pacífico Occidental.

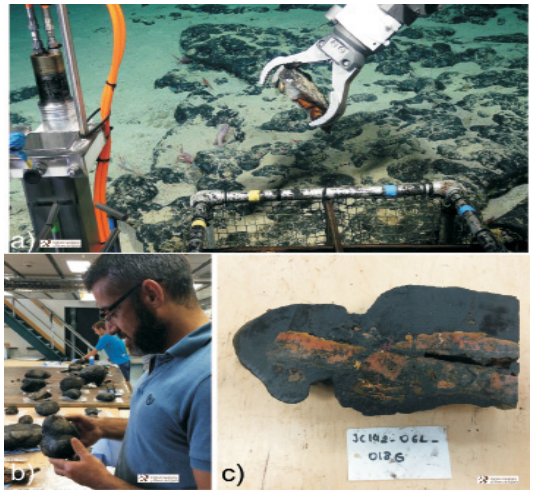

Fig. 8. A) Muestreo de costras polimetálicas mediante brazo articulado del ROV; b) Muestras de costras polimetálicas; c) Detalle de costra polimetálica rica en telurio.

En los fondos marinos de España, se han descubierto elementos estratégicos y raros en concentraciones superiores a las de muchos yacimientos de tierra firme en costras de ferromanganeso en los montes submarinos situados el oeste de las islas Canarias (Fig. 8). El telurio, aunque de importancia, no es el único elemento estratégico contenido en estos montes submarinos. También se han identificado otros elementos estratégicos como las tierras raras y el cobalto, todos ellos empleados en nuevas tecnologías.

Aunque en España no existen empresas especializadas en tecnologías de exploración minera submarina, la empresa canadiense *Nautilus Minerals* (http://www.nautilusminerals.com) es pionera en la exploración/explotación de sulfuros masivos en aguas jurisdiccionales de Papúa Nueva Guinea y Fiji. Por otra parte, Japón es el primer estado que ha iniciado en 2017 los primeros test de minería submarina en sus aguas jurisdiccionales.

¿Con qué profesionales se relaciona?

En nuestro país las tareas desarrolladas por los geólogos marinos han ido creciendo progresivamente en el campo de la investigación, geología aplicada y docencia. El geólogo marino no es generalmente un especialista aislado, sino que suele integrarse en equipos multidisciplinares que reúnan profesionales de diferente procedencia académica: geofísicos, biólogos, químicos, físicos, ingenieros, informáticos. El carácter multidisciplinar de los estudios marinos se ve favorecido por las circunstancias que rodean la investigación marina, que precisa de grandes inversiones y una metodología específica que requiere una logística compleja, así como la necesidad de compartir buques oceanográficos y equipos con un mantenimiento muy caro. Estos factores han promovido la colaboración y el compartir recursos.

Referencias bibliográficas

Copley, J. (2014). Just how little do we know about the ocean floor?, Sci. Am., 9 October 2014, http://www.scientificamerican.com/article/just-how-little-do-we-know-about-the-ocean-floor/.

Ercilla; G., Córdoba, D., Gallart, J., Gracia, E., Muñoz, J.A., Somoza, L., Vázquez, J.T., Vilas, F. and Grupo Prestige (2006). Geological characterization of the Prestige sinking area. Recent sedimentary processes in the Galicia Bank (NW Iberian Margin): An integrated study using high-resolution marine geophysical methods. Marine Pollution Bulletin, 53: pp 208-219.

González, F. J., Somoza, L., Hein, J. R., Medialdea, T., León, R., Urgorri, V., Reyes, J. y Martín-Rubí, J. A. (2016). Phosphorites, Co-rich Mn nodules, and Fe-Mn crusts from Galicia Bank, NE Atlantic: reflections of Cenozoic tectonics and paleoceanography. Geochem. Geophys. Geosyst. 17, 2, pp 346-374. http://dx.doi.org/10.1002/2015GC005861

Manzanares, A. M., González, J., Somoza, L., Farjas, M., León, R. y Medialdea, T. (2013). Potencial de la minería submarina: Aplicación SIG para el estudio previo de contratos de exploración de costras de ferromanganeso con alto contenido en cobalto en los fondos marinos internacionales conforme al código minero regulado por la AIFM (Kinsgton, Jamaica). Actas del XIII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales (CIERM 2013). Fundación de Investigación Tecnológica Luis Fernández Velasco.

Marino, E., Blasco, I., Blanco, L., González, F.J., Somoza, L. y Medialdea, T. (2017). Llega la era de la minería submarina. Tierra & Tecnología 49 (ICOG) http://dx.doi.org/10.21028/em.2017.05.12

Medialdea, T., Somoza, L., León, R., Farran, M., Ercilla, G., Maestro, A., Casas, D., Llave, E., Hernandez-Molina, F.J., Fernández-Puga, M.C. y Alonso, B. (2007). Multibeam backscatter as a tool for seafloor characterization and identification of oil spills in the Galicia Bank. Marine Geology doi: 10.1016/j.margeo.2007.09.007.

Payton, C.E. (1977). Seismic Stratigraphy – Application to Hydrocarbon Exploration. American Association of Petroleum Geologists (AAPG), Tulsa.

Rey, J. y Somoza L. (2016). Cabrera submarina: el Patrimonio desconocido. En: EL PARQUE NACIONAL MARÍTIMO-TERRESTRE DEL ARCHIPIÉLAGO DE CABRERA: UN PAISAJE ENTRE LA TIERRA Y EL MAR. Cap-5. Instituto Geológico y Minero de España-Organismo Autónomo de Parques de Parques Nacionales.

Somoza, L. y F.J. González (2011). Minería submarina. Se inicia la explotación de los fondos oceánicos. Enseñanza de la Ciencias de la Tierra, AEPECT 2011 (19.1), pp. 110-113.

Somoza, L. (2012). España amplía sus fronteras en el mar. En: XXX Semana de Estudios del Mar. Editorial Fundación ASESMAR. Cap. 3. pp. 45-66.

Somoza, L., Vázquez, J.T., González-Aller, D., Dañobeitia, J.J., Medialdea, T., Moya, A.J., Fernández- Salas, L.M., León, R., Jurado, M.J., Paredes, M., Palomino, D., Vargas, I., González, F.J., López-Rodríguez, M., Corbalán, A., González, P., Hernández-Puentes, M.P. y Martín-Jiménez, D. (2012). Estudios geofísicos e hidroacústicos del volcanismo submarino activo de la Isla de el Hierro (Archipiélago canario). GeoTemas 13, pp. 601-605.

Somoza, L., González, F.J., Barker, S.J., Madureira, P.; Medialdea, T., de Ignacio, C., Lourenço, N., León, R., Vázquez, J.T. y Palomino, D. (2017). Evolution of submarine eruptive activity during the 2011-2012 El Hierro event as documented by hydroacoustic images and remotely operated vehicle observations. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. DOI: 10.1002/2016GC006733.

Vail, P. R., Mitchum, R. M. Jr., and Thompson, S. (1977). Relative changes of sea level from coastal onlap. In: Payton, C. E. (ed.), 1977: Seismic Stratigraphy – Application to Hydrocarbon Exploration. American Association of Petroleum Geologists (AAPG), Tulsa. Mem 26, 63–82.

Vine, F. J. and Matthews, D. (1963). Magnetic anomalies over oceanic ridges. Nature, 4897, 947–949.

Wegener, A. (1966). The Origin of Continents and Oceans, Translation by J. Biram. Mineola: Dover Publication.

El geólogo cartógrafo

Roberto Rodríguez Fernández y Alejandro Robador Moreno, con la colaboración de Fabián López Olmedo, Angel Martín Serrano, Jerónimo Matas, Luis Miguel Martín Parra, Manuel Montes, Francisco Nozal, Ester Boixereu y Jesús García Sanz
IGME

La cartografía geológica es la disciplina que, empleando diversas técnicas, expresa mediante una representación gráfica la información geológica referida a un sector de la corteza terrestre. El producto resultante es el *Mapa Geológico* que es la figuración sobre un plano, de la naturaleza, distribución espacial y relaciones geométricas de los materiales que afloran en la superficie terrestre, observables tanto directa como indirectamente y representables, a una escala determinada, sobre una base topográfica o cualquier otro soporte de información geográfica.

En el mapa geológico la distribución espacial de las unidades representadas, así como la naturaleza de sus contactos y su disposición geométrica, permite deducir las relaciones de "parentesco" entre las rocas o unidades diferenciadas, reconstruir su secuencia temporal de formación y visualizar su disposición tridimensional bajo tierra.

Un mapa geológico puede ser la primera introducción en el conocimiento para un geólogo que está reconociendo una zona, y puede también representar la culminación de sus investigaciones en un área. Es, por tanto, un mecanismo de comunicación geológica que sintetiza el conocimiento existente de un sector determinado. El mapa es el resultado final del trabajo geológico, y siempre tiene un componente de observación y otro de interpretación; el segundo será tanto más exacto cuanto más preciso sea el primero.

Los objetivos finales de la cartografía geológica incluyen un análisis y expresión de los conocimientos de un sector de la corteza terrestre, vincular estos resultados a un sistema geográfico de referencia y establecer un código de lectura para que el mapa geológico sea un banco de datos para futuros usos. Todo esto implica que el mapa tiene que estar dotado de una leyenda de símbolos y datos gráficos para interpretar la geología.

Generalmente, el mapa geológico presenta dos lecturas: una primera, que transmite la información básica contenida en el mapa; y, otra segunda, que extrae la información, no directamente visible, por medio de cálculos gráficos o numéricos, aplicando diversas técnicas.

Breve historia de la cartografía geológica

Aunque existen precedentes desde la antigüedad, las primeras representaciones cartográficas modernas de un rasgo natural de carácter geológico pueden atribuirse a Ferdinando Marsigli (1658-1730) ingeniero militar italiano, que dibujó el que puede considerarse primer mapa proto-geológico en el que muestra la distribución de varios afloramientos de yeso y azufre de la región de Bolonia en 1717; también realizó el suntuoso mapa mineralógico de Hungría en 1726, dónde se sitúan los principales yacimientos minerales.

Un trabajo mucho más ambicioso y sistemático fue el abordado a partir de 1746 por el francés Jean-Etienne Guettard (1715-1786). El propósito de Guettard era representar, sobre la completa y reciente cartografía del Reino de Francia elaborada por la familia Cassini, toda la información disponible sobre el sustrato geológico, especialmente la distribución de las canteras de rocas y los yacimientos minerales. Como resumen de sus trabajos presenta en la Academia de Ciencias de París, en 1746, un mapa sobre la distribución de minerales y rocas en el Reino de Francia, incluyendo parte de Inglaterra. Mediante este trabajo, Guettard percibe la existencia de un orden y regularidad en la distribución de los diferentes tipos litológicos y llega incluso a apuntar el carácter predictivo de los mapas sobre la distribución de minerales; sin embargo, estos mapas, al igual que los anteriores, se limitan a una representación bidimensional ignorando la existencia de estratos, así como el concepto de superposición de los mismos.

Este tipo de mapas mineralógicos en los que se representaba la distribución de minerales y la extensión de las diferentes litologías, fueron ampliamente desarrollados en la Escuela de Minas de Freiberg, bajo el influjo del profesor Abraham Gottlob Werner (1749-1817), dibujando sus alumnos muchos mapas de este tipo, conocidos como mapas geognósticos, de diversas regiones europeas.

Sin embargo, hay que esperar a comienzos del siglo XIX para que aparezcan los auténticos mapas geológicos en los que subyace una interpretación tridimensional de la distribución de los materiales que componen la corteza terrestre. Este es un paso conceptual que llevó al agrimensor inglés William Smith (1769-1839) a elaborar una tabla de formaciones geológicas y dibujar un pequeño mapa geológico de los alrededores de la ciudad de Bath en 1799. Smith alcanzó a comprender que los diferentes estratos de rocas son elementos de una sucesión vertical de capas que se disponen conforme a determinadas pautas, encontrándose siempre en la misma posición relativa, y que además su contenido fósil podía incluso identificarlos y caracterizarlos. Este brillante descubrimiento, dota a este autor de una innovadora herramienta cartográfica y le permite publicar, en 1815, el primer mapa geológico de Inglaterra y Gales que, significativamente, acompaña de un corte geológico.

Casi al mismo tiempo, en 1811, el paleontólogo francés Cuvier (1769-1832) y el mineralogista francés Brongniart (1770-1847), llegan a parecidas conclusiones y publican el *Mapa geológico de los alrededores de París* (*Carte géognostique des environs de Paris*), en el que ya tienen en cuenta el principio de la sucesión faunística y de la superposición de estratos, aunque no dibujan secciones geológicas del subsuelo.

Los primeros mapas geológicos de una parte del territorio español aparecen en 1834: se trata del mapa de Extremadura del ingeniero francés Frederic Le Play (1806-1882) y el mapa de la isla de Mallorca del militar italiano La Mármora (1789-1863).

Un año después, en 1835 Guillermo Schulz (1805-1877) publica el *Mapa petrográfico del Reino de Galicia, a escala 1:400.000* que forma parte de un estudio general: *la Descripción Geognóstica del Reino de Galicia*. Seis años después, Felipe Naranjo (1809-1877) publicó un mapa geognóstico de las cercanías de Burgos, a escala aproximada 1:350.000 el que debe considerarse como primera cartografía geológica de una parte de España, realizada por un autor español. Otro pionero de la geología española, Joaquín Ezquerra del Bayo (1793-1859), tras elaborar un interesante bosquejo, el *Croquis Geognóstico de la Cuenca del Duero*, a escala aproximada de 1:1.000.000 como parte de un detallado trabajo regional, publica en Stuttgart en 1850, la primera cartografía de todo el territorio nacional (*Bosquejo Geognóstico de España*) a escala aproximada de 1:5.000.000.

A partir de esa fecha, con la creación, por Real Decreto de 12 de Julio de 1849 de la Comisión para la Carta Geológica de Madrid y General del Reino, cambia, muy favorablemente el escenario donde se va a desarrollar la cartografía geológica española. Esta iniciativa establece como finalidad primordial la elaboración del mapa geológico de todo el país, actividad que se fundamenta: "*En la utilidad de las Ciencias de la Tierra para el desarrollo y bienestar de los pueblos y los beneficios y aplicaciones que su conocimiento*

tenía en sectores tan variados como la minería, las obras públicas, la agricultura, el abastecimiento de agua a los núcleos de población, así como en la construcción y edificación". Sorprende que en un texto tan temprano ya se establezca la relación entre el levantamiento de los mapas geológicos y el desarrollo social de un país. Ya entonces se supo comprender el valor social de la cartografía geológica, tal como se ha podido confirmar a lo largo de sus casi 170 años de historia.

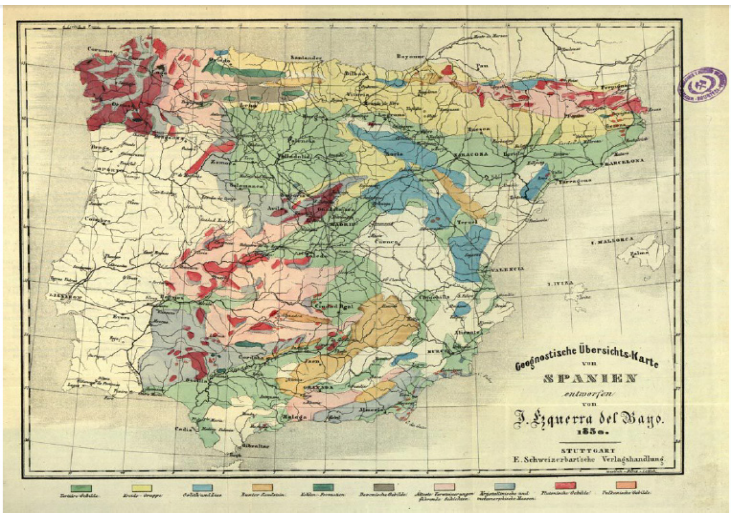

Fig. 1. Mapa geológico del territorio peninsular español. Compilado por J. Ezquerra del Bayo en 1850.

Primeras series sistemáticas de cartografía geológica en España

Desde los primeros momentos de actividad de la Comisión, se elabora un plan para realizar un levantamiento geológico de la totalidad del territorio español. En 1850 cambia su denominación por la de "Comisión del Mapa Geológico de España" y, en 1852, aparece publicada su primera obra: el Mapa Geológico de la Provincia de Madrid. La publicación, en 1889, del primer conjunto mural del Mapa Geológico de la España peninsular a escala de 1:400.000 y los 7 tomos de la Explicación del Mapa Geológico de España, en 1895, constituyen los primeros grandes hitos en la elaboración de una cartografía geológica sistemática del conjunto del Estado Español.

La cartografía geológica detallada, desarrollada según la cuadrícula de las hojas topográficas a escala 1:50.000 comenzó a programarse en 1866, pero no es hasta, 1910 cuando el ya denominado Instituto Geológico de España, se va a encargar de la elaboración de este plan sistemático de cartografía geológica conocido como *la 1ª Serie del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000.* En el año 1928, y ya bajo su denominación

definitiva de Instituto Geológico y Minero de España, esta institución publica la hoja de Alcalá de Henares que, constituye la primera hoja de este nuevo programa.

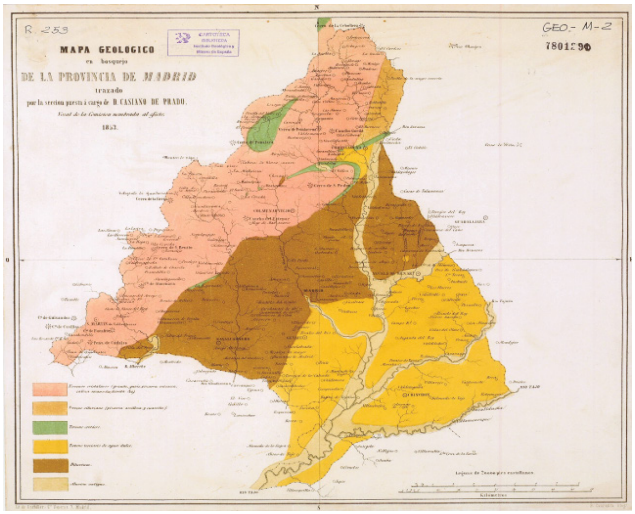

Fig. 2. Mapa geológico de la provincia de Madrid. Primer mapa publicado por la Comisión del Mapa Geológico de España, realizado por Casiano del Prado en 1853.

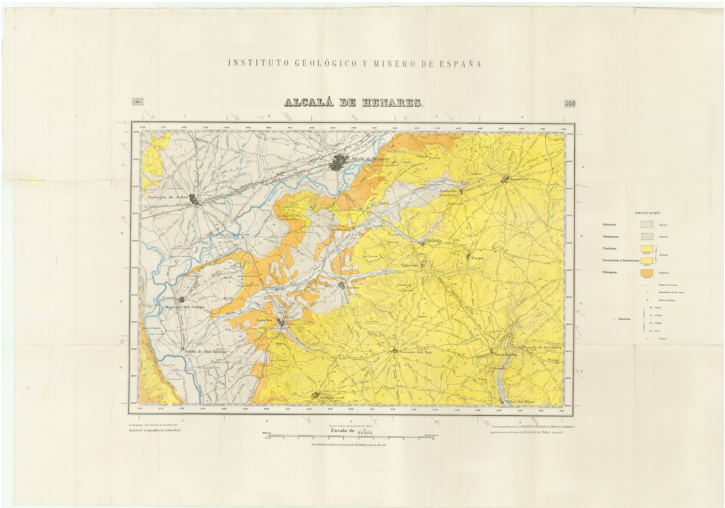

Fig. 3. Mapa geológico de la hoja de Alcalá de Henares, 1928. Primer mapa de la serie de cartografía sistemática a escala 1:50.000 del IGME.

Esta serie pervivió a todos los avatares políticos de la primera mitad del siglo XX, pero finalizó inconclusa en 1971, momento en que se imprimió la última hoja, que hacía el número 442 de las 1.180 hojas del programa, lo que supone un 40% de realización.

En 1916, la Mancomunitat de Catalunya crea el Servei del Mapa Geològic de Catalunya que desarrolla un programa de cartografía geológica sistemática a escala 1:100.000. Esta entidad publica un total de 5 mapas geológicos antes de la supresión de la Mancomunitat por el régimen de primo de Ribera en 1925, quedando la serie inconclusa.

2ª Serie del Mapa Geológico de España: El Plan MAGNA

En los inicios de la década de los años 70 del siglo XX, el gobierno de España concibe un plan de desarrollo económico del Estado para el cual se precisa una gran cantidad de recursos naturales. Con este objetivo se diseña un nuevo plan de cartografía geológica sistemática a escala 1:50.000 que sustituirá a la 1ª Serie del **M**apa **G**eológico de **E**spaña.

Este nuevo plan, que desarrollará el IGME, se diseñó durante los años 1970 y 1971, con el objetivo de dotar al país de una infraestructura geológica de calidad uniforme, elaborada con las metodologías más actuales en cada momento, y expresada en un formato y con unas normativas también homogéneas. Este nuevo proyecto recibió el nombre de Plan MAGNA, acrónimo de **M**apa **G**eológico **N**acional.

En la evaluación y valoración económica del programa MAGNA se utilizaron criterios novedosos y homogéneos, teniendo en cuenta parámetros como la dificultad geológica, la accesibilidad y la climatología, entre otros. El despliegue geográfico de este plan se realizó de acuerdo con las prioridades de los sectores necesitados de esta moderna infraestructura geológica que, como se anticipaba en el Real Decreto de creación del Instituto, seguían siendo la Minería, las Obras Públicas, la Agricultura, la Planificación Económica y del Territorio, etc... Para ello se realizó una encuesta en la que se consultaron 84 organismos e instituciones públicas y 45 empresas o entidades del sector privado.

El Proyecto del Mapa Geológico de España a escala de 1:50.000, 2ª Serie, (MAGNA) se finalizó en 2004 y constituye, sin duda, la serie de cartografía geológica más importante de cuantas se han realizado en España.

Durante los 30 años de ejecución del Plan MAGNA, participaron en su realización más de 600 geólogos cartógrafos y unos 450 especialistas diversos, pertenecientes a más de 20 empresas de ingeniería o consultoría, 9 facultades de Ciencias Geológicas, 2 Escuelas Superiores de Ingenieros de Minas, 2 servicios geológicos regionales, además del personal propio del Instituto Geológico y Minero de España.

El valor de la inversión total se estima en 127 millones de euros. La realización de cada hoja geológica de dificultad media, ha exigido la dedicación equivalente a 1,8 geólogos/año, computando tanto el trabajo de campo, como los de laboratorio y apoyo de expertos

en las diferentes disciplinas geológicas, de forma que el coste unitario de una Hoja ha sido de unos 100.000 euros.

Valor económico y social de la cartografía geológica. Ejemplo del plan MAGNA

Debido a la gran cantidad de aplicaciones potenciales que presenta un mapa geológico la rentabilidad económica de los esfuerzos dedicados a su realización es muy difícil de cuantificar. A nivel internacional han existido algunos intentos de evaluar económicamente los programas de cartografía geológica. En Estados Unidos, la bibliografía publicada por el Servicio Geológico (USGS) está siempre ligada a casos reales y soportada por cálculos empíricos específicos, no pudiendo extraerse valoraciones globales. De todos estos estudios, los de mayor repercusión internacional han sido los de Bernknopf *et al.* (1993,1997), donde se calculan los beneficios de una cartografía geológica de mayor escala que la preexistente mediante la estimación de los ahorros generados en la localización de vertederos o en el diseño de carreteras, con un ratio beneficio/coste de la nueva cartografía de mayor detalle comprendido entre 2,11 y 4,03. En España. el Programa Nacional de Investigación Minera (PNIM) de 1972, en el que estaba incluido el Plan MAGNA, contabilizó sus posibles beneficios brutos en el equivalente de 277,89 millones de euros de 2003, que, una vez deducidas las inversiones necesarias, se transformaron en unos beneficios netos de 193,83 millones de euros, con un ratio beneficio/coste de 3,3. Esta estimación consideraba únicamente los beneficios generados por la utilización de la cartografía geológica en los sectores de las aguas subterráneas, investigación minera, obras públicas y agrícola.

En el año 2000, el USGS realizó el estudio "*Beneficios económicos de los mapas geológicos detallados de Kentucky*" donde perfeccionó la metodología de encuesta a usuarios, esta vez para determinar el valor de la cartografía geológica detallada en este Estado y considerando una gran variedad de potenciales usuarios. El rango del ratio beneficio/coste que este estudio arroja para el programa de cartografía geológica 1:24.000 de Kentucky es de 24,99 a 39,16. Esta metodología ha servido de base para la evaluación económica y social del Plan MAGNA, una vez adaptada a la realidad española, lo que constituye la única iniciativa española de evaluar el beneficio social de la cartografía geológica.

Para realizar la evaluación en el caso del MAGNA se hizo una encuesta a un total de unos 1.200 usuarios actuales o potenciales de mapas geológicos. El ratio de respuestas obtenido, un 26% (311 cuestionarios recibidos), se considera una muestra suficientemente representativa de los usuarios de las hojas MAGNA. Entre los distintos expertos encuestados se encuentran principalmente técnicos activos en los sectores de ingeniería, universidades y minería e hidrocarburos además de la Administración Pública, el medio ambiente, la construcción y la agricultura. Los encuestados debían rellenar un cuestionario que demandaba datos sobre la utilización de las hojas MAGNA, posibles

informaciones adicionales de interés a incluir en futuros programas y una evaluación subjetiva de su valor económico. El análisis de las respuestas recibidas permitió deducir que los usuarios demandan mantener los formatos papel y digital, este último con ciertas funcionalidades de análisis y con toda la información complementaria de las hojas, una mayor cobertura del territorio con cartografía geomorfológica (sólo el 40% del MAGNA dispone de este tipo de cobertura), y mejorar el tratamiento de la geología del subsuelo.

En cuanto a la evaluación económica, los beneficios en euros del Plan MAGNA, entendidos como el ahorro que la utilización de las hojas ha generado en los usuarios, se han evaluado en 2.200 millones aproximadamente, con un valor mínimo de 1.255 millones y un valor máximo de 3.340 millones, lo que permite afirmar que el ratio beneficio/coste medio del Plan MAGNA es de 18, con una horquilla comprendida entre 10,35 y 27,54. Este cálculo está sometido, obviamente, a las incertidumbres propias del resultado de la encuesta. A pesar de todo, el resultado es sin duda conservador ya que, en dos aspectos importantes, se han adoptado decisiones "a la baja" como la estimación del número de hojas vendidas y la asunción de que cada ejemplar adquirido por el usuario se utiliza en un solo proyecto.

Puede concluirse, por tanto, que el Plan MAGNA, con un ratio beneficio/coste de 18 veces ha sido una excelente inversión pública, superando con creces las expectativas contempladas en los informes de evaluación económica iniciales que estimaban ratios considerablemente menores. Se pone de manifiesto con todos estos datos, la envergadura del Proyecto MAGNA en sus contenidos, y el esfuerzo técnico y económico que ha sido necesario para su realización.

El mapa geológico en la actualidad

Un mapa, y como tal dentro de ellos el mapa geológico, consiste en una base de datos georeferenciada espacialmente. En efecto, cada elemento del mapa tiene asociada una geometría y posición espacial y al mismo tiempo, ese elemento representa, mediante un código de simbología normalizado, un rasgo o dato obtenido del medio natural mediante un proceso de abstracción realizado por el científico que dibuja el mapa. Este concepto, que subyace en los mapas geológicos desde el inicio de sus tiempos, es con el desarrollo de los ordenadores y los Sistemas de Información Geográfica, una realidad evidente. Las tecnologías de almacenamiento y manipulación digital de la información han multiplicado la usabilidad de los datos contenidos en los mapas, que previamente a su desarrollo, sólo podían ser analizados, explotados y transformados mediante un costoso y experto trabajo por parte de un geólogo cartógrafo.

El geólogo cartógrafo moderno debe por tanto integrar estas tecnologías en sus rutinas

de trabajo en las tres etapas básicas del trabajo cartográfico. De este modo, las nuevas tecnologías afectan a la toma de datos en el campo, la representación y composición del mapa y al tratamiento de los datos contenidos en la cartografía para obtener resultados concretos.

El desarrollo de los sistemas gps y su integración en dispositivos de almacenamiento numérico móviles, como ordenadores portátiles, PDA, tabletas digitales, y sobre todo teléfonos inteligentes o Smartphone, entre otros, ha revolucionado el proceso de registro y obtención de los datos en el campo. En la actualidad existe una gran cantidad de aplicaciones que operando a través de diferentes sistemas operativos: Windows, iOs, Android, Linux, corriendo sobre estas plataformas permiten registrar datos geológicos georeferenciados directamente en el campo, de forma que puedan ser integrados automáticamente en la base de datos que conforma el mapa. En unos casos se trata de herramientas genéricas de geolocalización de los datos que apunta el geólogo como si fuese una libreta de campo. Pero se encuentran también aplicaciones diseñadas específicamente para el trabajo geológico, que permiten el registro de la orientación espacial de una superficie geológica con sólo apoyar sobre ella el dispositivo y la representación simbolizada de los datos espaciales sobre el boceto del mapa en construcción. Estas operaciones en el campo permiten disponer del dato digital que no necesita ser de nuevo manipulado para integrarse en el resultado final y facilitan la capacidad de análisis espacial de cartógrafo mientras se encuentra todavía sobre el terreno.

La representación cartográfica es otra de las tareas en las que el desarrollo de la información digital incide en las labores cartográficas. Hoy día todo el trabajo de cartografía geológica se realiza directamente o se vuelca sobre sistemas de información geográfica, que constituyen el auténtico soporte real de los datos cartográficos, siendo las ediciones en soportes físicos (papel) o lógicos, como distintos tipos de documentos digitales (p. ej. archivos pdf), simples expresiones de la base de datos.

Finalmente, las bases de datos digitales, como las que componen el mapa geológico tienen capacidades de análisis y relación que permiten explotar los datos contenidos en ellas y combinarlos con datos de otras fuentes para elaborar mapas derivados, aplicados a la resolución de problemas específicos. La integración de datos de diferentes orígenes exige una normalización de los formatos lógicos, campos y contenidos de las bases de datos, así como la existencia de listas y vocabularios controlados. Esta es la base de la iniciativa europea representada por la directiva INSPIRE cuyo objetivo es facilitar la obtención de datos cartográficos sobre aspectos medioambientales desde diferentes bases de datos que sean interoperables en todo el ámbito europeo.

Los geólogos cartógrafos deben ser conscientes de las posibilidades que abren la

interoperatividad de la información geológica y las ventajas que para ello supone la normalización de los datos, por lo que deben ser disciplinados a la hora de plasmar los datos de sus investigaciones en los mapas que realizan. Afortunadamente, el mapa geológico se beneficia de un largo proceso internacional de normalización de simbología de representación cartográfica y de definición de entidades que permite a un geólogo leer mapas geológicos de cualquier parte del mundo.

El trabajo del geólogo cartógrafo: tipos de mapas que realiza el geólogo

El geólogo cartógrafo debe utilizar el conocimiento y los avances técnicos actuales para expresar en un mapa el tipo de rocas, su génesis, las relaciones entre ellas y los procesos que han sufrido de la forma más rigurosa, con el fin de que la cartografía geológica sea lo más útil posible y mantenga su validez con el transcurso de los años.

El geólogo cartógrafo debe conocer el estado actual del conocimiento en las geociencias, en general, y estar especializado en las disciplinas de la Geología relacionadas con los objetivos del tipo de mapa geológico a realizar, o de la naturaleza de los materiales a cartografiar, en particular: mapas geológicos en áreas de basamento o de cobertera, mapas geomorfológicos, etc. Es conveniente además, que conozca las posibilidades y limitaciones de los avances realizados en las técnicas auxiliares, como los nuevos métodos de adquisición de datos a través de satélites, la Geoquímica, la Geofísica y la Geocronología, y muy especialmente, las técnicas de explotación, manipulación y representación de la información mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG), y la posibilidad de representar espacialmente los datos mediante técnicas y software de 3D y poder validar así los modelos geométricos. La administración de la información obtenida en formato digital, el escalado de la misma y la posibilidad de volcarla en la red para acceder a la misma en tiempo real, abre unas posibilidades muy lejanas de las que nuestros científicos hace un siglo soñaban.

Naturalmente, el geólogo en el campo no dispone de toda esa infraestructura para realizar la primera tarea, que es la adquisición de los datos. La geología actual requiere la colaboración de equipos multidisciplinares, pero sí entra en su competencia captar correctamente los datos y determinar las técnicas auxiliares y los equipos de trabajo idóneos para realizar la cartografía correcta en un determinado marco geológico.

Para realizar un mapa geológico, en primer lugar se hace una amplia revisión de información geológica existente, se analizan las fotografías aéreas y las imágenes de satélite, sobre las que se hace una primera interpretación (fotogeología). A partir de ahí, se planifica y realiza el trabajo de campo, haciendo recorridos para adquirir datos de utilidad cartográfica (contactos, buzamientos,..), solucionar problemas cartográficos y

hacer interpretaciones geológicas ¨in situ¨ en los afloramientos rocosos. Las posibilidades tecnológicas actuales permiten tanto el estudio remoto de los afloramientos, como la obtención de datos espaciales georeferenciados directamente transportables desde la medida en el campo a la base de datos que constituye el objetivo final del trabajo, lo que multiplica el número de observaciones y la calidad de las interpretaciones obtenidas. Esta actividad se simultanea con la toma de muestras para el estudio de su petrología, analizando láminas delgadas -de 0,3 mm de espesor- de la roca, realizando análisis químicos o estudiando su contenido fosilífero.

En la actualidad, el geólogo puede realizar los mapas geológicos de forma individual, o integrado en un equipo multidisciplinar de trabajo, formado por distintos especialistas de geología. Cuanto más complejo y variado es el mapa a realizar, la participación de diferentes especialistas es más aconsejable para asegurar la calidad del mismo.

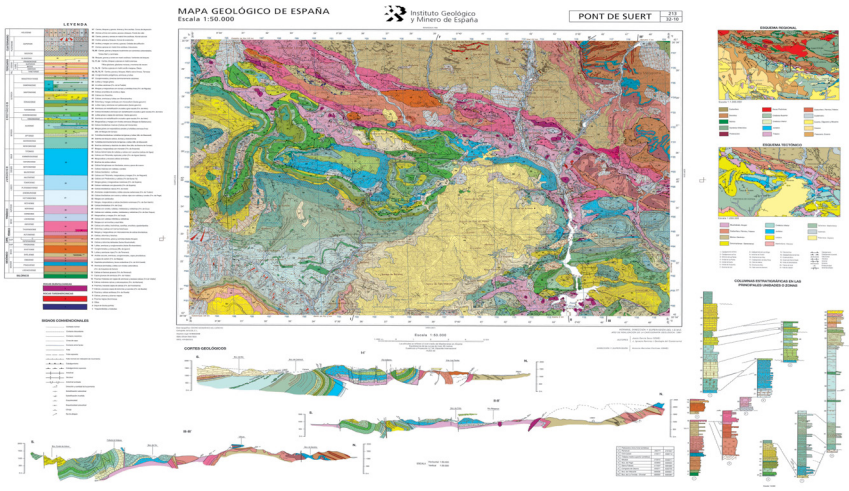

Fig. 4. Ejemplo de una hoja de la 2ª serie de cartografía geológica a escala 1:50.000 del IGME,serie MAGNA.

Tipos de mapas que el geólogo realiza

El mapa por excelencia que realiza un geólogo cartógrafo es el **Mapa Geológico**, en el que se representan una serie de unidades litoestratigráficas, que son agrupaciones de rocas con litología y edad común, definida bien por su contenido paleontológico, por técnicas geocronológicas o por criterios sedimentarios. Además de estas unidades, formadas normalmente por estratos y que son denominadas formaciones, grupos o miembros, se representan otros materiales no estratificados como son todo el conjunto de rocas ígneas, plutónicas, volcánicas y subvolcánicas.

La información geológica referente a edades y litologías de las rocas se representa gráficamente mediante diferentes recintos de colores y/o tramas, por lo que un mapa geológico siempre debe contener una leyenda que permita interpretar toda la información reflejada en el mismo. Las relaciones estructurales entre las distintas unidades se representan mediante un tipo de símbolos característicos lo que otorga al mapa un carácter tridimensional. Acompañan pues a la leyenda, una librería de símbolos que sirve de complemento a la misma. de complemento a la misma.

Toda esta información se completa con uno o varios *cortes geológicos*, en los que se expresa gráficamente la disposición geométrica en profundidad de las unidades que aparecen en el mapa geológico.

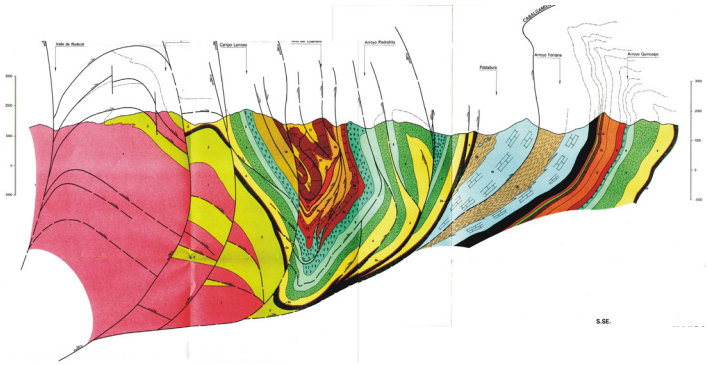

Fig.5. Ejemplo de un corte geológico.

Los mapas se han editado generalmente en soporte de papel, que es el documento más fácilmente manejable para el usuario en campo. Sin embargo, actualmente es cada vez más frecuente la edición en soporte digital. Normalmente, los mapas geológicos van acompañados de una memoria explicativa, y suelen ser editados por los servicios o institutos geológicos de los diferentes países, o bien por instituciones equivalentes de regiones, estados federados o comunidades autónomas.

Las escalas de representación de los mapas son diferentes según la finalidad de los mismos. Normalmente, se habla de mapas a gran escala o de mapas a mediana o pequeña escala. Los primeros comprenden mapas editados a escalas comprendidas entre 1:10.000 y 1:50.000, los de media escala son mapas editados desde 1:100.000 hasta 1:500.000, y se reserva la denominación de pequeña escala para mapas editados a escalas comprendidas entre 1:1.000.000 a 1:5.000.000. Las escalas 1:25.000 y 1:50.000 son las más frecuentemente utilizadas para la elaboración de mapas geológicos. La escala 1:200.000 es utilizada para trabajos de carácter regional o como infraestructura básica en temas relacionados con la minería y/o la hidrogeología. Los mapas geológicos a

pequeña escala suelen ser mapas geológicos murales de países, como el Mapa Geológico de la península ibérica, Baleares y Canarias, a escala 1:1.000.000 editado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) varias veces desde el siglo XIX. Por el contrario, las escalas detalladas, se prestan más para la edición de mapas aplicados en el campo de la minería o la geotecnia.

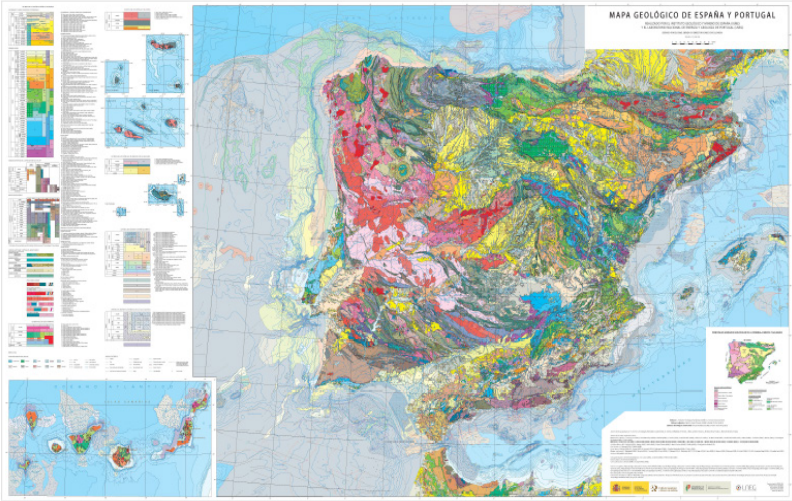

Fig. 6. Mapa geológico de España y Portugal a escala 1:1.000.000, IGME - LNEG. Última edición de 2015.

La información de un mapa geológico es susceptible de ser utilizada para diversos fines, elaborando mapas derivados de él, destacando de forma selectiva la información que contienen, o resaltando aquellas unidades que presentan un interés específico. Así, podemos obtener mapas tectónicos, paleogeográficos, de rocas industriales, de características del terreno para la construcción, de permeabilidad, etc.

Los mapas derivados de la base geológica, y los que representan determinadas características específicas de carácter geológico, se conocen como **Mapas Geotemáticos.**

Pueden ser de diverso tipo, tanto en su contenido como en sus fines, y estar destinados a uso científico, a fines didácticos, o a su utilidad práctica para la resolución de problemas determinados. En función de su carácter, los mapas geotemáticos pueden incluir de forma parcial o total los elementos básicos de representación del mapa geológico o formar cartografías especiales con alguno de esos elementos de forma exclusiva o preferente.

Son muy diversos y numerosos los mapas geotemáticos que el geólogo puede realizar, dada la importancia y utilidad de estos. Muchos de ellos se elaboran de forma sistemática mientras que otros requieren de una cierta especialización. Actualmente, la información

geológica asociada a procesos recientes es bastante demandada y tiene su expresión gráfica en los Mapas del Cuaternario, sobre todo en los *Mapas Geomorfológicos* y en los *Mapas de Procesos Activos*.

Mapas Geomorfológicos. Son mapas analíticos e infraestructurales de utilidad general, que proporcionan una información organizada y precisa de las formas del terreno y de los procesos geodinámicos que con ellas se relacionan. Su elaboración tiene como base el mapa geológico del que incorpora todo aquello relativo a la geología de superficie.

Mapas de Procesos Activos. Derivan de los anteriores y en ellos se reflejan los procesos de carácter endógeno u exógeno que han acaecido sobre una zona de estudio. Se destacan los procesos de ladera, erosión, inundación, sedimentación y antrópicos, así como la actividad sísmica, volcánica o geotectónica que hubiesen tenido lugar. Proporciona un inventario de procesos geodinámicos funcionales que tiene una organización muy parecida a la del mapa geomorfológico, aunque introducen además rangos de cualificación relativa referidos a la actividad de cada proceso. Ambos mapas en sí mismos son de gran utilidad para obtener otras cartografías geotemáticas muy relacionadas con las obras públicas, el urbanismo, la planificación del territorio, el medio ambiente, la desertización, la erosión y los riesgos naturales, por lo que constituyen un documento básico y originario para tales fines.

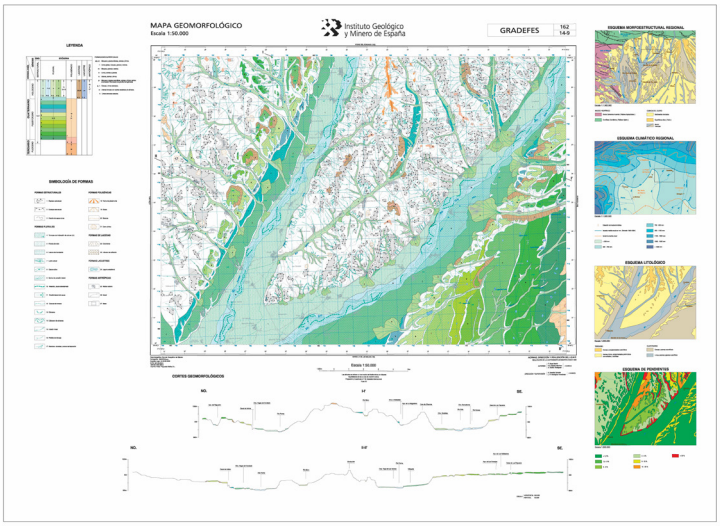

Fig.7. Ejemplo de mapa geomorfológico a escala 1:50.000 desarrollado en la serie MAGNA.

Mapas Hidrogeológicos. Este tipo de mapas informan sobre las aguas subterráneas y sobre las características hidrogeológicas de las rocas que conforman el sustrato (porosidad, permeabilidad, etc.), así como de la dirección de la escorrentía subterránea. También

incluyen información sobre situación de sondeos, pozos de agua, fuentes, manantiales y, a veces, sobre la calidad de las aguas.

- **Mapas Metalogenéticos**, de **Rocas Industriales** y, en general, de **Recursos Minerales.** Todos ellos proporcionan información sobre la ubicación, relaciones y génesis de los principales yacimientos de un territorio determinado, y sobre las características de las rocas que lo conforman y sus propiedades físicas, para su aplicación desde el punto de vista industrial.

- **Mapas de Geología Ambiental,** enfocados a la ordenación y uso del territorio y en los últimos años, el impacto económico y social de los desastres naturales ha propiciado de forma definitiva los *Mapas de Peligrosidad y/o Riesgo Geológico*, otro tipo de cartografía geotemática de gran utilidad y aplicación inmediata.

- **Mapas Geotécnicos.** Se realizan a diferentes escalas y ponen de manifiesto, e indican, el comportamiento mecánico de los materiales, así como sus características constructivas. Se realizan para trabajos relacionados con obras lineales (autovías, carreteras, ferrocarriles, etc.), así como también se hacen para la construcción de embalses u otro tipo de obras, tales como centrales, polígonos industriales, e incluso para conocer las características geotécnicas del terreno o sustrato de una determinada zona o donde se encuentra ubicada una población.

Herramientas que utiliza el geólogo cartógrafo y conocimientos que se requieren

El geólogo cartógrafo en su actividad debe utilizar diversas herramientas y conocimientos geológicos que varían considerablemente según el tipo de materiales que afloran, del contexto geológico de la zona a cartografiar y del tipo de mapa que se ha de realizar (geológico o geotemático). La cartografía geológica necesita de la integración de procedimientos y técnicas propios de diferentes disciplinas, tales como la Geología Estructural, Petrología, Estratigrafía y Sedimentología, Geoquímica, Geocronología y Paleontología.

La cartografía geológica en cuencas sedimentarias poco deformadas se basa en la caracterización de las diferentes facies sedimentarias que constituyen su relleno, por lo que las disciplinas que el geólogo cartógrafo utiliza en estos materiales son principalmente la Estratigrafía y Sedimentología, la Paleontología, y la Petrología Sedimentaria, sin descuidar la Geología Estructural, puesto que también en las zonas externas las rocas se ven afectadas por estructuras tectónicas como pequeñas fallas, diaclasas o flexiones.

Una herramienta muy útil en la cartografía de cuencas sedimentarias es la Estratigrafía

Secuencial. El objetivo explícito de la Estratigrafía Secuencial es la división del registro sedimentario en conjuntos de estratos genéticamente relacionados, utilizando para ello superficies de discontinuidad y/o sus concordancias que constituyen los límites de las Secuencias Sedimentarias. La cartografía de los diferentes tipos de límites de secuencia (discordancias, paleosuelos, cambios bruscos en la vertical, superficies erosivas, etc.) junto con la caracterización litológica, sedimentológica y paleontológica de cada secuencia es una de las labores fundamentales del geólogo cartógrafo en este tipo de cuencas y es la base científica para el conocimiento de su arquitectura y evolución, así como para una adecuada correlación entre distintas cuencas.

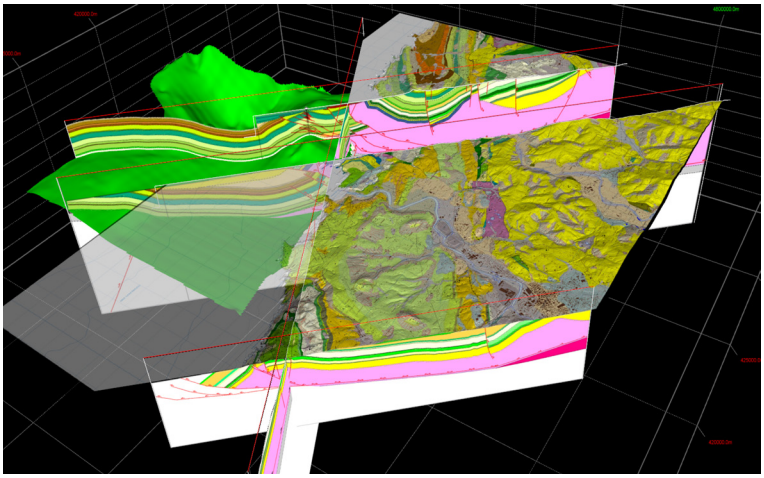

Fig. 8. Modelo geológico 3D elaborado mediante herramientas informáticas. Se observa el mapa geológico proyectado, diversos cortes geológicos y una superficie reconstruida mediante geofísica.

El método geocronológico más comúnmente empleado en el estudio de las cuencas sedimentarias es el estudio del contenido paleontológico. De este modo, la Bioestratigrafía es la disciplina que permite asignar a las unidades cartografiadas su edad geológica correspondiente y se aplica tanto en cuencas marinas como continentales. En las cuencas continentales, donde el registro paleontológico es relativamente escaso y puntual, se utiliza últimamente, y con muy buenos resultados, la Magnetoestratigrafía que se basa en la realización de secciones sistemáticas, sobre columnas con datos paleontológicos conocidos, con el objeto de obtener un registro de los cambios en la polaridad magnética terrestre tomando como base la orientación respecto a este campo magnético de algunos minerales. Una datación magnetoestratigráfica se obtiene mediante la correlación del registro magnetoestratigráfico local con el registro global de inversiones del campo magnético terrestre denominado “Escala de Tiempo de Polaridad Geomagnética”.

tanto a pequeña como a mediana escala, así como de su evolución espacio-temporal. Entre sus objetivos principales se pueden citar, la descripción geométrica de las estructuras que afectan a los cuerpos rocosos, el análisis cinemático y dinámico de los procesos que dan lugar a las estructuras previamente descritas y la elaboración de modelos que expliquen estas estructuras. Estos métodos son suficientes en las zonas externas de un orógeno, que se caracterizan por la existencia de cinturones de pliegues y cabalgamientos, sin deformación interna asociada ni metamorfismo. En las zonas internas de los orógenos es característica la presencia de deformación interna y metamorfismo en las rocas, siendo frecuente en los niveles más profundos la aparición de rocas gnéisicas.

La cartografía en estas áreas debe prever varios aspectos: 1) La intensa deformación y neoformación de minerales puede obliterar la fábrica sedimentaria o ígnea, así como la secuencia estratigráfica inicial. 2) Existencia de foliación de crenulación en las áreas de medio y bajo grado de metamorfismo, e importante desarrollo en las zonas de alto grado de procesos de diferenciación por fusión parcial y de las intrusiones ígneas. 3) La mayoría de las estructuras plegadas en estos terrenos no son cilíndricas, desarrollándose complejos modelos de interferencia en tres dimensiones y anchas zonas deformadas por cizalla.

En las áreas de medio y bajo grado de las zonas internas, así como en las zonas externas, la Paleontología puede ser una valiosa ayuda para datar las rocas. Sin embargo, en terrenos de alto grado, las únicas posibilidades de datación las proporcionan los métodos radiométricos en rocas intrusivas o volcánicas.

En áreas de basamento intensamente deformadas y metamorfizadas es indispensable contar también con las técnicas y métodos de la Petrología Metamórfica, que ha experimentado un gran avance en las últimas décadas gracias a tres líneas de trabajo: a) integración de datos de campo con datos de microscopio, variaciones en la composición mineral y datos isotópicos, b) modelos experimentales que han posibilitado conocer las características termodinámicas de los principales minerales formadores de rocas y c) las investigaciones que han profundizado en la estructura termal de la corteza terrestre y en la modelización de su evolución en distintos ambientes geodinámicos y bajo distintos procesos tectónicos. La combinación de los datos metamórficos y estructurales es imprescindible para deducir los accidentes que separan distintas unidades estructurales. Por ello, la principal herramienta para el estudio de los procesos orogénicos en áreas de basamento es el conocimiento de la relación entre metamorfismo y deformación, lo que se consigue mediante las trayectorias P-T-t-deformación. Con esta herramienta podemos reconocer trayectorias características de diversos marcos geodinámicos como son, zonas de subducción, arcos isla, cuñas orogénicas, zonas extensionales, etc.

En áreas de basamento con predominio de rocas ígneas, la Petrología Ígnea es una herramienta fundamental que debe emplear el geólogo cartógrafo. Esta disciplina comienza hacia la mitad del siglo XIX con la técnica de la lámina delgada de roca –que en España la introdujo José Macpherson, en 1875-, que hace posible la existencia de la microscopía petrográfica. Esta técnica proporciona un análisis riguroso de la mineralogía y relaciones texturales de este tipo de rocas, permitiendo su delimitación cartográfica de una forma precisa y rigurosamente fundamentada.

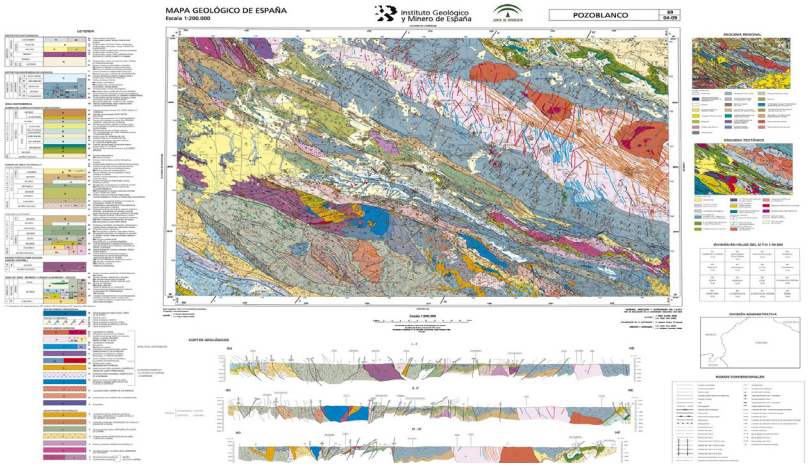

Fig. 9. Ejemplo de una hoja de la serie de cartografía geológica a escala 1:200.000 del IGME.

Más recientemente, las rocas ígneas han sido estudiadas para obtener información sobre los procesos involucrados actualmente en la generación de magmas y su ámbito geodinámico. Esta información es fundamental para entender la petrogénesis de antiguas secuencias plutónicas y volcánicas que puede haber sido parcialmente borrada por la deformación y metamorfismo subsiguientes en áreas de basamento. La caracterización geoquímica de las rocas ígneas originales, por otra parte, nos ayuda a situar las rocas en un determinado ámbito geodinámico de formación, en relación con la tectónica de placas.

Los datos que nos proporcionan la Geología Estructural, Petrología Metamórfica e Ígnea son fundamentales a la hora de cartografiar áreas de basamento y situar su origen y evolución dentro del marco geodinámico correspondiente.

Junto con otros métodos de datación, como la posición estratigráfica relativa y la Paleontología, la Geocronología es fundamental a la hora de situar en el tiempo los distintos procesos (tectónicos, metamórficos e ígneos) que han sufrido las rocas en un área de basamento en las que es habitual que se superpongan diversos episodios tectonotermales y donde a menudo no existen fósiles o no se observan relaciones

claras con rocas de edad conocida. Los métodos más utilizados son los basados en la desintegración de elementos radiactivos, tanto para datar episodios ígneos (plutónicos o volcánicos), como para datar eventos de cristalización, recristalización metamórfica o deformativos contemporáneos con el metamorfismo. Estos son: *potasio-argón* ($^{40}K/^{40}Ar$) y *argón-argón* ($^{40}Ar/^{39}Ar$), para obtener la edad de enfriamiento en rocas ígneas, mediante la datación de micas, hornblenda y polimorfos de alta temperatura del feldespato potásico; *rubidio-estroncio* ($^{87}Rb/^{87}Sr$), usado para la datación de granitos que no hayan sufrido posteriormente un recalentamiento metamórfico, así como para discriminar entre un origen mantélico o cortical de la roca; *samario-neodimio* ($^{147}Sm/^{143}Nd$), muy útil para datar rocas ígneas básicas y ultrabásicas, así como para discriminar entre magmas de origen mantélico o cortical; y *uranio-torio-plomo* ($^{232}Th/^{208}Pb$, $^{235}U/^{207}Pb$ y $^{238}U/^{206}Pb$), en circones y monacitas principalmente, muy utilizado para datar rocas ígneas, tanto plutónicas como volcánicas, principalmente ácidas. Recientemente, la aparición de la sonda iónica de alta resolución (SHRIMP), permite obtener edades de distintos eventos térmicos sucesivos sobre un solo cristal zonado.

¿Para qué sirven los mapas geológicos? Utilidad de la cartografía geológica: principales aplicaciones

El mapa geológico es un documento único e imprescindible para conocer el territorio ya que refleja de un modo gráfico los diferentes tipos de rocas que constituyen el sustrato -invisible para la mayoría- del suelo sobre el que vivimos.

Pero saber de qué está hecho el suelo que pisamos tiene multitud de aplicaciones prácticas. El mapa geológico es básico para la exploración y evaluación de recursos minerales ya sean metálicos, energéticos o bien rocas y minerales industriales, de los que estos últimos España es un importante productor a escala europea y mundial. Los recursos minerales son precisamente la razón inicial de los grandes planes de cartografía geológica en el mundo. En España, el proyecto del Mapa Geológico Nacional (Plan MAGNA) nació como una consecuencia de los planes de desarrollo de los años sesenta, y su objetivo era, "*abrir el país a la inversión extranjera para la explotación de los recursos minerales, pensando que sería un importante motor de desarrollo*".

El mapa geológico es también un documento básico en la investigación y evaluación de los recursos de aguas subterráneas, aspecto este último que, a pesar de su crucial importancia, no es, en muchos casos, tenido en cuenta a la hora de planificar y evaluar los recursos de las cuencas hidrográficas.

Los estudios geológico-geotécnicos para las grandes infraestructuras del estado, o para la construcción de edificios o instalaciones, son otro de los campos dónde el mapa

geológico es necesario. Los debates sobre los problemas derivados del sustrato en las grandes obras de infraestructura por la existencia de arcillas expansivas, limos colapsables, dolinas en terrenos yesíferos o caudalosos acuíferos que salen a la luz por obras de túneles, son una manifestación evidente de esta clara necesidad.

El almacenamiento estratégico de gas, de residuos radioactivos, de CO_2, de desechos industriales o peligrosos, en estructuras geológicas subterráneas implica la necesidad de conocer la geología del terreno al utilizar y su comportamiento pasado, presente y futuro. La cartografía geológica es un instrumento crucial en este tipo de estudios y proyectos.

Finalmente, otro de los grandes campos de aplicación del mapa geológico es la prevención y mitigación de los riesgos geológicos (deslizamientos, inundaciones, erosión, terremotos, riesgos volcánicos, etc.), donde el mapa geológico se convierte en el mejor instrumento de planificación, para evitar la construcción de viviendas, obras, campings o infraestructuras en zonas con riesgo evidente.

Referencias bibliográficas

Barrera, J.L. (2000). Demanda científica, técnica y social de la Cartografía Geológica del ITGE y evolución futura. Boletín Geológico y Minero. Número especial 2000. 85-94.

Bernknopf, R.L., Brookshire, D.S., Soller, D.R., McKee, M.J., Sutter, J.F., Matti, J.C. y Campbell, R.M. (1993). Societal Value of Geologic Maps. U.S. Geological Survey Circular 1111. 53 pp.

Bernknopf, R.L.,Brookshire, D.S., McKee, M.J. y Soller, D.R. (1997). Estimating the Social Value of Geologic Map Informations: A Regulatory Application. Journal of Environmental Economics and Management. 32, Article nº EE960963. 204-218.

Boixereu Vila, E. (2016). Evolución histórica de la cartografía geológica en España: desde sus orígenes hasta los mapas de Verneuil y Collomb (1864) y Maestre (1864). Tesis doctoral inédita. Universidad Politécnica de Madrid. 487 pp

Boixereu, E. y Oliveira, D. (2017). Los mapas de recursos minerales de la Península Ibérica: unos mapas con mucho interés. En: García Quintana, A., Callapez Tonicher, P. y Barroso-Barcenilla, F. (eds.), Los mapas de la Naturaleza/Os mapas da Natureza. R. Soc. Esp. Historia Natural, Madrid, 155-174.

Ecominsa. (1983). Estudio de la rentabilidad y valoración de la cartografía básica infraestructural realizada por el IGME. Informe IGME, 94 pp.

García-Cortés, A. (2000). La Cartografía Geológica y Geotemática del ITGE, una experiencia sesquicentenaria con vigencia actual y vocación de futuro. En ¨150 años del ITGE: estudio e investigación en Ciencias de la Tierra¨. Publicación especial ITGE.

García-Cortés, A., Vivancos, J. y Fernández-Gianotti, J. (2005). Evaluación económica y social del Plan MAGNA. En ¨Evaluación económica y social del Plan MAGNA de cartografía geológica escala 1: 50.000¨ (Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España). 28-58.

Goy, J.L. (2000). Evaluación crítica de la cartografía geológica del ITGE: finalidad y evolución. Boletín Geológico y Minero. Número especial 2000. 59-64.

López-Olmedo, F. (2017). Las series cartográficas: el Mapa Geológico. En: García Quintana, A.; Callapez Tonicher, P. y Barroso-Barcenilla, F. (eds.), Los mapas de la Naturaleza/Os mapas da Natureza. R. Soc. Esp. Historia Natural, Madrid, 107-123.

Martín-Serrano, A. (2017). El Mapa Geomorfológico: Una cartografía geológica peculiar e útil. En: García Quintana, A.; Callapez Tonicher, P. y Barroso-Barcenilla, F. (eds.), Los mapas de la Naturaleza/Os mapas da Natureza. R. Soc. Esp. Historia Natural, Madrid, 127-153.

Portero, J.M. (2000). Evaluación crítica de la cartografía geológica del ITGE: la cartografía MAGNA en terrenos sedimentarios. Boletín Geológico y Minero. Número especial 2000. 65-72.

Robador, A. (2017). Los mapas geológicos. En: García Quintana, A., Callapez Tonicher, P. y Barroso-Barcenilla, F. (eds.), Los mapas de la Naturaleza/Os mapas da Natureza. R. Soc. Esp. Historia Natural, Madrid, 91-105.

Rodríguez Fernández, L.R. (1991). Las cartografías temáticas producidas por el Instituto Tecnológico Geominero de España. IV Jornada Técnica Temática de la Sociedad Española de Cartografía, Fotogrametría y Teledetección. Madrid. Junio 1991.

Rodríguez Fernández, L.R. (1992). Las cartografías temáticas producidas por el Instituto Tecnológico Geominero de España: La Cartografía MAGNA y otras cartografías geológicas derivadas. MAPPING, nº 3. 70-80.

Rodríguez Fernández, L.R. (2000). Los mapas geológicos producidos por el ITGE: evolución, actualidad y futuro. Boletín Geológico y Minero. Número especial 2000.15-36.

Rodríguez Fernández, L.R. (2000). Actualidad y futuro de los mapas geológicos

del ITGE. Tierra y Tecnología 20. 21-32.

Rodríguez Fernández, L.R. (2005): El Plan MAGNA, evolución histórica y perspectivas futuras. En: Evaluación económica y social del Plan MAGNA de cartografía geológica escala 1: 50.000. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. 13-28.

El geólogo en la exploración y explotación minera

Manuel Regueiro y González-Barros
Instituto Geológico y Minero de España (IGME)
Roberto Oyarzun
Geólogo (*Retirado*)

La importancia de la actividad minera y de la geología de minas

El hombre ha sido minero y geólogo desde los albores de la humanidad. Primero a través de las industrias líticas: fragmentos de rocas o minerales más o menos trabajados para su uso como herramientas o armas; luego continuó con los metales, extrayéndolos desde los minerales (edades del Cobre, Bronce, Hierro), refinándolos y combinándolos en aleaciones a medida que progresaba, de paso, inventando la metalurgia. Esta es una historia de búsqueda de recursos, de su minería (Fig. 1 y 2), y de las aplicaciones tecnológicas de los productos obtenidos. Se puede decir, por lo tanto, que la minería es la industria más antigua y la de minero y geólogo 'la segunda profesión más antigua'.

Fig. 1.Mina de hierro El Romeral (Chile), años 1990's

La humanidad progresó vertiginosamente durante el siglo XX, generando falsas ilusiones sobre lo que parecía un futuro muy alejado de sus balbuceantes comienzos industriales hacia finales del siglo XVIII y comienzos del XIX. Pero ¿cuál es la realidad presente? Lo cierto es que la sociedad sigue siendo absolutamente dependiente de los recursos minerales, con ejemplos tan clásicos como los metales hierro, cobre, zinc, o menos tradicionales pero cada vez más relevantes como las rocas y minerales industriales. Hoy, la industria minera extrae anualmente alrededor de 40.000 Mt brutas de materiales, para producir 29.000 Mt de más de 100 minerales y rocas distintos comercializables. Por otra parte, la incorporación de las llamadas economías emergentes (China, Brasil, India, etc.) no ha hecho más que incrementar de manera notable la demanda de recursos minerales. A destacar en este apartado los llamados metales tecnológicos, cada vez más importantes en el mundo de la electrónica miniaturizada, como las tierras raras, niobio, tántalo, etc.

Esas sustancias, para que tengan interés para la industria, deben ser capaces de producirse de manera legal y rentable y, especialmente hoy en día, de un modo **ambientalmente sostenible**. Es decir, los depósitos minerales son **elementos geológicos** que pueden investigarse científicamente por si mismos o como parte de un ecosistema local y **elementos económicos** que deben evaluarse en lo que respecta a las autorizaciones pertinentes y su rentabilidad.

El advenimiento de las nuevas tecnologías (p.ej., microelectrónica) es complementario, y no alternativo en la mayoría de los casos. Baste con poner de ejemplo los materiales requeridos para la construcción de un edificio o una carretera (arena, grava, áridos, cemento, acero, zinc, cobre, etc.), aviones o coches (una larga lista de metales comunes o especializados, materiales cerámicos), el tendido eléctrico (acero para las torres, cobre en el cableado).

Analicemos por un momento el ordenador que uno tiene al frente: componentes de cobre, piezas de aluminio, un cable de cobre para enchufarlo al tendido eléctrico, una pantalla de cristal (sílice), o el mismo chip procesador (silicon chips !!!). Por último, si nos remitimos a las tecnologías avanzadas, no olvidemos que el sistema ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) funciona a través del mismo hilo de cobre que porta la señal telefónica.

Si se piensa por un momento, se llegará a la conclusión que detrás de casi cada aspecto de la vida moderna está esa actividad oculta, a veces no bien entendida, que es la minería. Al respecto hay una frase muy ilustrativa que aparece en una pegatina de la Nevada Mining Association: *If it isn't grown it has to be mined* (si no se cultiva, habrá que extraerlo de una mina). En este sentido, si bien es comprensible un cierto nivel de ignorancia sobre estas materias por una parte importante de la sociedad, no lo es tanto en lo que se refiere a los

gobernantes, ya que, si ha habido una actividad perseguida por leyes progresivamente más severas, esta es la minería. Si lo que se ha pretendido es proteger el medio ambiente

en España o Europa en general, el resultado final de estas medidas, es la exportación del problema a terceros países. Y si bien no se quiere tener la actividad minera en casa, la demanda de productos mineros en los países de la UE no cesa ¿Genuina preocupación ambiental o hipocresía?

Fig. 2. Oxidados de cobre precipitados en la corta de Mina Sur (distrito minero de Chuquicamata) reflejados sobre una charca.

Existe otro aspecto de la minería que la caracteriza y diferencia de las demás industrias: los yacimientos minerales están donde están y no pueden cambiarse de ubicación, como una fábrica de cualquier otro producto. En otras palabras, los recursos minerales poseen un valor 'localizado'. Hay que asumir por eso que como **la localización de los yacimientos los dicta la naturaleza**, no dependen del hombre que necesita esos minerales para su supervivencia. De esta manera, hay que tener muy claras las prioridades a la hora de decidir sobre si un determinado yacimiento se pone o no en explotación por cuestiones sociales o ambientales. En otras palabras, este tipo de decisiones pueden comprometer el futuro de la propia sociedad que se pretende defender.

En resumen, la industria minera es esencial para el desarrollo de la sociedad moderna y, además, ofrece retos muy interesantes para carreras geológicas en temas como explotación y exploración de rocas y minerales metálicos y no metálicos de uso industrial.

El papel del geólogo en la industria minera

El geólogo en la explotación de minas: los comienzos (pasado y presente)

El papel del geólogo en una mina ha variado significativamente durante el siglo XX. En

los primeros tiempos, la labor geológica en una mina (si es que se realizaba alguna) era llevada a cabo por un ingeniero de minas, con mayores o menores conocimientos sobre el tema.

En la década de los años 1920s, el contenido en oro del yacimiento de Homestake (USA) decrecía y pareció que se iba a agotar el rico filón. Dos ingenieros de la plantilla encargados de analizar el futuro de la mina observaron que a niveles por debajo de los 375 m, las dimensiones de los filones disminuían rápidamente, concluyendo que éstos terminarían en roca estéril a los 600 m; en otras palabras, Homestake se agotaba. El presidente de la compañía (Edward Clark) no daba crédito a los informes pesimistas, aunque era evidente que la producción estaba disminuyendo. Contrariamente a las costumbres de la época tomó la decisión de pedir un segundo informe a otro experto, un **geólogo de minas** perteneciente a una **institución académica** (en aquellos años, dos herejías al mismo tiempo). El geólogo elegido era Donald D. McLaughlin, profesor de la Universidad de Harvard, quien antes de dedicarse a la enseñanza, había consagrado varios años a trazar mapas de las zonas ricas en cobre de los Andes peruanos. McLaughlin pasó el verano de 1926 estudiando la roca que afloraba en las laderas y el interior de Homestake. Lo que vio le llevó a una conclusión diametralmente opuesta a las pesimistas predicciones anteriores: lejos de agotarse, el filón era rico y extenso. Lo que había engañado a los ingenieros de Homestake era la peculiar forma del filón. McLaughlin determinó que el filón había sido originalmente una masa ininterrumpida, que posteriormente había sido atravesada por diques estériles, que encerraban bolsas de mineral. Desde el principio los mineros habían volado y transportado a superficie la roca estéril junto con la masa filoniana aurífera, procedimiento largo y costoso. El excelente mapa que McLaughlin dibujó de la geología de la mina, permitía predecir el curso del filón por las zonas aun no explotadas. Trazó luego los planos de las nuevas galerías, de manera que siguieran el filón, evitando las zonas de roca estéril. A muchos empleados de Homestake les hizo poca gracia que un geólogo de Harvard les viniera a decir que estaban haciendo mal su trabajo, y a McLaughlin le resultó difícil convencerles. Pero cuando se adoptó el plan de explotación selectiva, el valor de cada tonelada subió a más del doble. Fue así, en gran medida, que los métodos de la geología de minas, tal como los sentó McLaughlin en Homestake, se fueron haciendo imprescindibles en las minas de todo el mundo. Esta historia real nos lleva a una segunda reflexión, la geología son primero mapas, segundo mapas, y tercero mapas (Fig.3). Sin mapas no hay geología, es la base que sustenta todo el entramado en nuestra profesión. De poco o nada importan los supuestos méritos curriculares de un aspirante a geólogo de minas o exploración si entre estos no se encuentran las habilidades y destrezas necesarias para hacer un mapa geológico.

Otro paso de gigante lo daría Reno Sales, ingeniero de minas y geólogo, que fue el Jefe de Geología de la Anaconda Cooper Co. en Butte (Montana – USA) más de cuarenta años.

Gracias a Sales el estudio y cartografía geológica sistemática de los cuerpos mineralizados se convirtió en la práctica estándar de la industria, lo que le valió el título de "Padre de la Geología Minera". Reno Sales se graduó en la Universidad de Columbia en 1900, donde obtuvo el título de ingeniero de minas, siendo contratado de inmediato en Butte para resolver el inmenso número de demandas sobre la propiedad en profundidad de los filones que poseía la empresa Anaconda. Recordemos que la ley norteamericana (Apex Law) otorga la propiedad minera sobre "un filón" específico, y que para probar que dicho cuerpo mineralizado pertenece a la empresa en profundidad (donde pueden haber más filones) hace falta tener un conocimiento perfecto de la geología y mineralogía del cuerpo en cuestión. Esto hizo que los geólogos, que actuaban como peritos judiciales en los juicios necesitaran tener un conocimiento exhaustivo de los cuerpos mineralizados. En esta materia Reno Sales fue brillante, creando una metodología revolucionaria de cartografía geológica del interior de las minas.

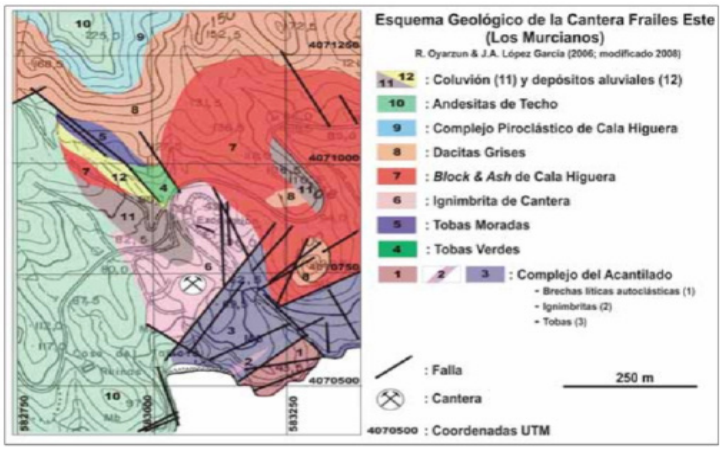

Fig. 3. Ejemplo de mapa geológico realizado para un estudio geominero en Almería.

En los años 1960's el método fue "exportado" a Chile, donde en la mina El Salvador se perfeccionó para permitir la cartografía de elementos propios de una mineralización tipo pórfido cuprífero. Por ejemplo, muchos geólogos de mina utilizan hoy en día la terminología de El Salvador para las venillas de alteración-mineralización A, B, D. El método se utilizó primero para la cartografía de galerías, luego para la testificación de sondeos y finalmente para la cartografía de bancos en explotaciones a cielo abierto. Por último el método Anaconda dio el salto final a operaciones mineras en yacimientos de diferente tipo. Como Jefe de Geología de la Anaconda Copper Co., Sales visitó los derechos mineros de la empresa en todo el mundo y creó departamentos de geología que funcionaran como en Butte. Se puede decir que el éxito de la Anaconda se puede atribuir en gran medida al trabajo de Reno Sales. En la misma línea podemos decir que todos los geólogos que hemos trabajado en temas de minería tenemos una deuda de inmensa

gratitud con él. Reno Sales aplicó la geología a las operaciones mineras y la importancia académica de su trabajo fue reconocida con un doctorado honoris causa en ciencias por el Montana State College en 1935. Además fue seleccionado como primer miembro del Salón de la Fama del Museo Mundial de la Minería en Butte.

Hoy en día, cualquier compañía minera medianamente importante dispone de un departamento de geología, sección también conocida en otros países como superintendencia de geología. Un departamento de geología puede tener hasta más de 10 geólogos, y en distritos mineros importantes, como el Chuquicamata en Chile, la cifra puede alcanzar a los 70 geólogos. Estos cumplirán distintas tareas en la mina (Fig. 4): cartografía, testificación de sondeos, estimación de reservas, planificación a corto, mediano y largo plazo de la explotación minera, estudios geotécnicos, estudios mineralógico-texturales. A estas labores habría que sumarles las de exploración en el entorno inmediato de la explotación minera o en áreas alejadas.

Fig. 4. El ámbito de trabajo en las minas. Distrito Minero de Chuquicamata (Chile).

El departamento de geología deberá tener un diálogo fluido y permanente con algunos departamentos de ingeniería (explotación, metalurgia). Esto es vital, ya que el ingeniero debe conocer de la manera más precisa posible el sector de la mina que se va a explotar, empezando por las características geotécnicas de la roca. En lo que se refiere a la parte metalúrgica, la labor del geólogo es doble. Por una parte debe indicar de manera exacta las leyes del mineral que entrará en la planta de tratamiento, y, por otra, las características mineralógicas y texturales de la mena y la ganga. Esto ha llevado a una nueva especialidad en el campo de la geología de minas que se llama “geometalurgia”. En un caso ideal (y casi utópico) estas características no variarán de un punto a otro en la mina. Sin embargo, lo normal es que la abundancia relativa de los minerales varíe, lo cual puede tener repercusiones enormes. Supongamos a manera de ejemplo que la ley de cobre en una mina no varía substancialmente en profundidad, pero que la mena principal pasa de calcopirita a enargita. Este último mineral contiene arsénico, lo cual significa

que habrá repercusiones técnicas y ambientales; en otras palabras, habrá que adaptar la metodología extractiva. Por otra parte, el tipo y grado de molienda tendrá que adaptarse a las variaciones del grado de liberación de la mena. O qué decir de las explotaciones auríferas que operan con el método de lixiviación en pila (Fig. 5). El que la mena de oro sea rica o no en sulfuros tiene grandes implicaciones ya que el principal reactivo empleado (cianuro: CN-) tiende prioritariamente a formar compuestos con el azufre (tiocianato).

Fig. 5. Cianuración en pila en la mina El Solado, Chile. (2002).

El geólogo en la exploración de minas (*to boldly go where no man has gone before* - ir con atrevimiento donde nadie ha ido nunca)

Quienes exploran, como se organizan, como realizan su trabajo, cuales son los costes económicos, dónde exploran y porqué. Pero primero reseñemos los tipos de participantes en la exploración

- Los prospectores, que son individuos dedicados a la exploración, generalmente solos o en pequeños grupos. Generalmente carecen de una formación universitaria pero poseen una gran experiencia en rocas y minerales. Se trata de gente tenaz que pone su propio capital en riesgo, desde unos pocos miles hasta decenas de miles de dólares. Intentarán convencer a las compañías *Junior* sobre la importancia de sus hallazgos, y a veces acaban siendo contratados por estas para trabajos específicos

- Las compañías de exploración *Junior*, que se dedican casi exclusivamente a la exploración de yacimientos minerales. No suelen poseer explotaciones mineras. Juegan un papel crucial en la exploración mundial; de hecho la mayor parte de los descubrimientos de yacimientos en las últimas décadas lo han realizado compañías del tipo *Junior*.

- Las compañías de exploración intermedias a grandes (*Majors*), que son las

compañías que poseen y operan una o más minas. El *Metals Economics Group* separa las *Majors* de las *Intermediate* en función de sus ingresos anuales. Las grandes tienen ingresos de más de US$ 500 millones/año mientras que las intermedias están en el rango de US$ 50 a 500 millones/año. Las grandes tienen además presupuestos de exploración superiores a US$ 50 millones; por ejemplo en 2007 Barrick tenía un presupuesto anual de exploración de US$ 170 millones y un staff dedicado a ello de más de 500 profesionales. En lo que se refiere a exploración las *Juniors* son mucho más eficientes que las grandes y las razones son las siguientes: 1) Las grandes concentran su exploración y sondeos en los alrededores de sus yacimientos para expandir las reservas ya conocidas → *Brownfield Exploration*; las grandes además centran su atención en encontrar "grandes" yacimientos y así pierden oportunidades. 2) Las *Juniors* son empresarialmente más eficientes y están dispuestas a correr riesgos en terrenos desconocidos → *Greenfield Exploration*; además son más pequeñas, su burocracia es mucho menor y por lo tanto la toma de decisiones es más fácil.

En cualquier caso, nada como casos reales para contar de alguna manera, que es, y como se realiza la exploración. Reseñaremos aquí tres casos notables, donde la labor geológica jugó un papel decisivo. Pensamos que se trata de historias inspiradoras, que con un poco de suerte deberían se aleccionadoras en lo respecta al pensamiento geológico y mucho también a la actitud de los geólogos que trabajan en exploración. Recordemos que como J.D. Lowell planteó: el geólogo de exploración debe ser una persona con sólidos conocimientos geológicos, pero al mismo tiempo, no ser un pedante atenazado por el miedo a equivocarse, ya que su negocio consistirá en "equivocarse la mayor parte del tiempo". Volveremos más adelante sobre las características que debe tener un geólogo que trabaje en exploración.

1) *Donde dije digo, digo diego*: la importancia de ser adaptable. O cómo *wrong* también puede convertirse en *right* (Olympic Dam, Australia).

En los años 1950´s se desarrolló una auténtica revolución en el pensamiento geológico en Australia con respecto al origen de los yacimientos metalíferos del *Precámbrico*. Hasta entonces, estos yacimientos habían sido considerados como hidrotermales *s.s.*, esto es, generados por soluciones hidrotermales ascendentes provenientes de un magma granítico. Pero de pronto, empezaron a aparecer rasgos geológicos que apuntaban a que estas mineralizaciones podían ser de origen sedimentario, por ejemplo, el caso de Broken Hill.

Analicemos por un instante las consecuencias de este cambio radical del pensamiento. Estos yacimientos podían ser explicados en términos sedimentarios, sin que hiciera falta la intervención de cuerpos ígneos profundos. Este pensamiento se vio reforzado por

los estudios que habían realizado los geólogos ingleses (principalmente) en el *Copper Belt* de Zambia (en esa época: Rodesia del Norte). De acuerdo a las ideas prevalecientes, esos yacimientos de cobre (p.ej., Mufulira, Rokana, N'kola, etc.) se habían generado por procesos sedimentarios, en los que habían intervenido probablemente también, procesos bacterianos, electroquímicos, y exhalativos. Sumemos a esto que se suponía (y supone), que el cobre se había derivado del basamento de la secuencia Proterozoica que alberga las mineralizaciones estratiformes del *Copper Belt*. De esta manera, con sentido común, los geólogos australianos hicieron un rápido ejercicio mental percatándose de que en principio también ellos disponían de un basamento antiguo y una cubierta Proterozoica-Cámbrica, de tal manera, que ¿por qué no podía haber en Australia yacimientos de cobre equivalentes a los del Zambian Copper Belt?

En Australia del Sur estaban las rocas muy antiguas del cratón Gawler y, encima de éstas, en discordancia, las facies sedimentarias del Stuart Shelf. Reforzando aún más este pensamiento estaba la presencia de un pequeño yacimiento estratiforme de cobre emplazado en las facies del Stuart Shelf: Mount Gunson. Utilizando datos indirectos, tales como intersecciones de lineamientos gravimétricos y magnéticos de carácter regional-continental, los geólogos de la compañía minera Western Mining decidieron que el punto donde hoy está Olympic Dam era el más promisorio. Este modelo de exploración (teórico en muchos aspectos) se veía reforzado por el hecho de que el yacimiento de Mount Gunson estaba precisamente asociado a uno de esos lineamientos. Los sondeos comenzaron en 1975, cortando el primero de ellos sedimentos horizontales del Cámbrico y el Proterozoico (facies del Stuart Shelf). Luego, el sondeo pasó la discordancia (con el cratón Gawler) y cortó 40 m de mineralización de cobre de baja ley (~ 1 % Cu), y no fue hasta el noveno sondeo que se encontraron leyes económicas. Los geólogos de la Western Mining rápidamente se dieron cuenta de que había dos cosas que no encajaban con el modelo: la zona mineralizada estaba en el basamento, no por encima de éste, y la roca encajante de la mineralización eran brechas graníticas hematíticas, no sedimentos. Digamos que los hechos modificaron radicalmente la perspectiva dictada por el modelo de exploración. A continuación, a medida que se estudiaba en mayor detalle la geología del yacimiento, se continuó modificando el modelo.

Los hechos pueden ser resumidos de la siguiente manera: 1) modelo de exploración (pre-sondeos): yacimiento estratiforme de cobre en la cubierta sedimentaria de un basamento antiguo; 2) debris flow de brechas y avalanchas de roca a lo largo de los escarpes de fallas activas. Las brechas habrían sido mineralizadas por las soluciones provenientes de actividad geotermal en relación con un vulcanismo; y 3) el modelo avanzado: yacimiento principalmente hidrotermal formado hace unos 1.600 millones de años, asociado a diatremas que se formaron en relación con un vulcanismo ácido.

2) El descubrimiento de Kalamazoo (o como San Manuel recuperó su otra mitad)

Pocos ejemplos ilustran mejor la importancia de los estudios estructurales como el descubrimiento del yacimiento tipo pórfido cuprífero de Kalamazoo en la década de los 60, en el cual participó de manera fundamental el geólogo americano J.D. Lowell. Dicho descubrimiento está rodeado de varios aspectos notables entre los que habría que destacar, sobre todo, el estudio integral del problema. Si no entendemos la geología de una zona, poco podremos hacer en lo que respecta a exploración, salvo que se confíe en la suerte como elemento esencial del proceso. Esto cobra especial relevancia si lo que se está buscando es un cuerpo que puede no aflorar.

Los años 70 estuvieron marcados en el campo de la geología económica por la publicación de una serie de trabajos sobre alteración hidrotermal - pórfidos cupríferos en la revista americana *Economic Geology*. Quizás, el más significativo de ellos es un clásico en el tema: *Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits* (Lowell y Guilbert, 1970). Una de las ilustraciones más conocidas del trabajo muestra la zonación espacial de las facies de alteración hidrotermal en San Manuel-Kalamazoo (Arizona, USA). En la actualidad, dicha figura se encuentra en prácticamente todos los textos de estudio sobre yacimientos minerales. Sin embargo, un detalle a veces poco señalado (y en ocasiones omitido) en dicha figura, es la presencia de una falla que corta el esquema de manera oblicua. Se trata de la falla San Manuel y, como veremos a continuación, bajo el punto de la aplicación de métodos estructurales al estudio y exploración de yacimientos minerales, es un rasgo extremadamente importante, paradójicamente, poco o nada señalado en los textos de estudio.

San Manuel-Kalamazoo no es ni económica ni geométricamente un yacimiento único; por el contrario, se trata de dos cuerpos mineralizados basculados: San Manuel y Kalamazoo, notablemente separados en el espacio por una falla normal de bajo ángulo (falla San Manuel). Si bien originalmente constituían un solo cuerpo mineralizado, el movimiento normal de la falla cortó el cuerpo mineralizado generando los dos segmentos actualmente conocidos. San Manuel (más cercano a la superficie) se localiza a muro de la falla y Kalamazoo 1,6 km hacia el oeste (a una profundidad de 800-1220 m) a techo. Lo importante: si bien San Manuel era conocido, el descubrimiento de Kalamazoo (*Lower* K) fue la consecuencia de un trabajo geológico integrador, que relacionó las facies de alteración y la mineralización con la estructura. El razonamiento básico de exploración fue el siguiente (Lowell, 1968): 1) San Manuel representaba sólo una parte de un cuerpo mayor; 2) el cuerpo se encontraba basculado; y 3) la falla que cortaba San Manuel era normal y de bajo ángulo. Conclusión, un segmento de San Manuel tenía que estar más abajo, sobre la falla. Resultado, efectivamente, más abajo, hacia el oeste yacía un cuerpo mineralizado, luego bautizado como Kalamazoo.

3) La tenacidad de un geólogo de exploración (el caso de Bill Swayne – El Salvador, Chile)

Quizás si la historia de Bill Swayne no sea demasiado conocida, pero para muchos, éste geólogo es todo un "personaje" por el descubrimiento del pórfido cuprífero El Salvador (Chile). Su historia es aún recordada por los que han pasado en algún momento de su vida por El Salvador. Hacia 1955 Bill Swayne era el geólogo de exploración de compañía Andes Copper Co. (filial de la Anaconda Copper Co.) para Chile, con base en Santiago y Chuquicamata. Hasta entonces la Andes Copper Co. había estado explotando cobre en el yacimiento de Potrerillos (también un pórfido cuprífero), con una ley de cabeza de 1,8% Cu. Sin embargo, ésta había estado bajando sistemáticamente hasta llegar a valores de 0,8% Cu. La producción, que había alcanzado un récord histórico en 1942 con más de 100.000 toneladas de cobre fino, había caído a 50.500 en 1950 y 44.600 en 1955. Esta situación era insostenible y algo había que hacer. Hacia 1950 la Anaconda Copper Co. sabía que una montaña conocida como el Cerro de Indio Muerto tenía interés para la exploración, y lo importante es que el cerro sólo estaba a escasos 20 km (en línea recta) de la planta de fundición de cobre de Potrerillos, con lo cual las ventajas potenciales eran muchas. En consecuencia, se le ordenó a Swayne realizar un levantamiento de la zona de Indio Muerto y preparar un mapa geológico. Dado que el mapa mostraba un potencial muy interesante, se dio la autorización para comenzar a sondear.

Al respecto, perforar en Atacama en aquel entonces era un trabajo muy difícil de llevar a cabo, ya que no había contratistas en el sentido moderno del término, y bien se compraba una máquina de sondeos o se pedía prestada una. Además no era fácil llevar agua por unas carreteras casi inexistentes o inexistentes del todo. En este sentido, la paradoja a la que enfrentó Bill Swayne fue que la cooperación ofrecida por el personal técnico y la dirección de Potrerillos no iba más allá de la que se les había ordenado (estrictamente) desde los Estados Unidos. Más que paradoja esto fue una locura, si los trabajos de Swayne iban bien, los primeros beneficiados serían (precisamente) los trabajadores de Potrerillos (…).

El caso es que el resultado inicial de los sondeos fue entre pobre y francamente malo, razón por la cual se le ordenó por carta a Swayne desde los Estados Unidos acabar con la campaña. Aquí viene la parte emocionante de la historia, Bill Swayne no se preocupó demasiado de la orden. Consideró que dadas las condiciones técnicas de la época y lo perdido del lugar donde se encontraba, durante unas dos o tres semanas podría alegar (en su defensa) que no se había enterado de dicha orden (…). Bill Swayne movió las máquinas de sondeos una vez más al sector de Quebrada Turquesa y ahí ocurrió todo: un sondeo inclinado cortó el cuerpo mineralizado principal, con leyes que iban hasta el 3% Cu. El resto es historia.

El Salvador no sólo se transformaría en una importante mina de cobre, sino que en el

laboratorio geológico de referencia para la Anaconda Copper Co., que luego, con el correr de los años, y mucho trabajo geológico de por medio, daría lugar: 1) Al perfeccionamiento del método cartográfico (de mapeo) de la Anaconda. 2) A una de las publicaciones más brillantes sobre pórfidos cupríferos: *The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile* (Lewis B. Gustafson & John P. Hunt; 1975, Economic Geology, 70: 857-912).

Como nota final aclaremos que se descubrió El Salvador gracias a dos razones fundamentales:

- Porque no había teléfonos, ni fijos ni móviles (celulares) y sólo por esto pudo Swayne ignorar en el momento una orden directa y "tomarse su tiempo" para cumplirla. Hoy en día la gente no va ni al servicio sin antes consultarlo (o contarlo) a través del móvil.

- Porque Bill Swayne era "mucho" Bill Swayne, un geólogo que supo estar a la altura de las circunstancias y tomar una decisión crítica en momentos difíciles. Al respecto, los fracasos están llenos de frases del tipo: yo sólo cumplía órdenes…

Al respecto, el gran peligro actual consiste en lo que los americanos llaman *micromanagment* (microgestión), que consiste en un estilo de gestión mediante el cual un gerente observa de cerca y/o controla permanentemente el trabajo de sus subordinados o empleados; en general, se considera que la microgestión tiene una connotación negativa, principalmente debido al hecho de que genera una falta de libertad en el lugar de trabajo (Wikipedia, 2018). Trabajar a distancia (en el campo, aunque sea en un lugar remoto) no libra a los geólogos de la microgestión. El teléfono móvil (satelital o normal) reemplaza en este caso a la proximidad.

El trabajo del geólogo en la minería actual

Vamos a intentar dar respuesta a la serie de preguntas que se podría hacer cualquier geólogo o estudiante de geología que desee especializarse en este campo.

¿Qué es un geólogo que trabaja en la industria minera?

Es una persona que tiene como trabajo cotidiano la búsqueda, investigación y explotación de yacimientos minerales cuya explotabilidad sea económicamente rentable. El Dr. Ridge decía, ya en 1983, que las únicas razones por las que las compañías mineras contratan a geólogos son: encontrar yacimientos explotables con rentabilidad, o asegurarse de que la totalidad del depósito que está siendo minado es extraído, asimismo, en condiciones de rentabilidad.

Actualmente, hay dos grandes campos de la industria minera que determinan también dos tipos distintos de geólogos especialistas (Fig. 6):

- Minería metálica
- Minería de rocas y minerales industriales

Dentro de esos dos grandes campos, hay geólogos que trabajan en exploración minera exclusivamente y geólogos que trabajan directamente en la explotación de los recursos minerales en minas o canteras, en los estudios ambientales previos a la explotación, en el seguimiento ambiental de los trabajos de restauración simultáneos con la explotación y en los proyectos de restauración ambiental tras el término de las mismas.

Fig. 6.Geólogos en las explotaciones mineras de Radomiro Tomic (izquierda) y Mina Sur. Distrito Minero de Chuquicamata (Chile).

Los geólogos de exploración especialistas en minería metálica son los responsables de la localización de nuevos yacimientos o de investigar los conocidos.

Para localizar un yacimiento, los geólogos utilizan técnicas tales como sensores remotos (imágenes de satélite), fotogeología, cartografía geológica, petrología, geofísica (estudios con equipos magnéticos, radiométricos, eléctricos, sísmicos o gravimétricos) y geoquímica. Por otra parte, planifican y ejecutan campañas de muestreos superficiales y de sondeos con extracción de testigo continuo sobre cuyos testigos se realizarán los correspondientes ensayos de laboratorio. Toda la información obtenida deberá analizarse para elaborar los correspondientes informes de valoración preliminar, incluida una valoración económica previa.

Una vez localizado el yacimiento o yacimientos, se planifican, en función de los conocimientos geológicos adquiridos previamente, nuevas campañas de sondeos y

muestreos para definir el tamaño y calidad del cuerpo mineralizado (Fig. 7) para determinar, a fin de cuentas, si el yacimiento es o no explotable económicamente.

Los geólogos de exploración especialistas en rocas y minerales industriales deben estar más familiarizados con las características geológicas de los yacimientos de más de 50 rocas y minerales diferentes pertenecientes a todos los ambientes geológicos y geoestructurales conocidos. Estos productos mineros son utilizados simultáneamente en un importante número de industrias por sus propiedades físicas y químicas y no por la energía o elementos químicos que se puedan extraer de ellos. Debe conocer también las especificaciones de esos materiales para su empleo en las distintas industrias que, normalmente, son distintas para idénticas materias primas.

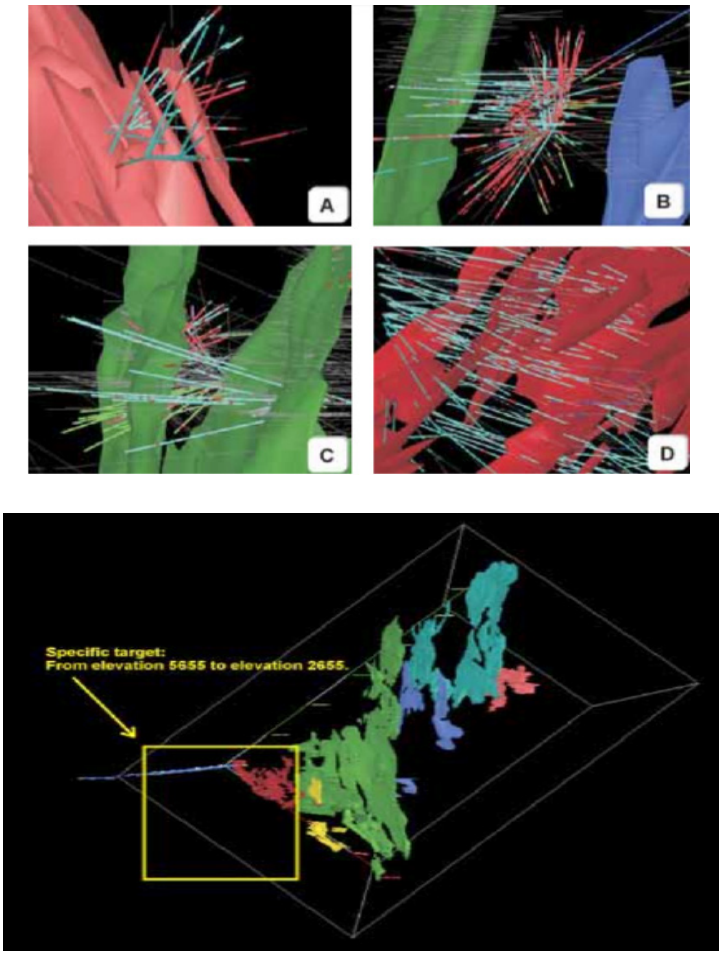

Fig. 7. Modelización 3D geológica, mina Red Lake, Canadá. Arriba, cuerpos mineralizados y sondeos. Abajo, blanco profundo de exploración aurífera.

Los geólogos que trabajan en minas y/o canteras a cielo abierto se dedican a labores cotidianas de gestionar los departamento geológicos de las empresas mineras, cuyo trabajo es establecer las propiedades geológicas y estructurales del yacimiento, realizando mapas de gran detalle tanto superficiales como, en su caso, del interior de la propia mina, al mismo tiempo que se testifican y analizan los sondeos, ya a la escala minera, que se van realizando con el avance de la explotación (Fig. 8).

Fig. 8. Izquierda: la moderna testificación de sondeos con ordenadores Tablet de campo (Mina Sur; Chuquicamata, Chile). A la derecha: geólogo estudiando un plano de falla en la mina Rosita (La Serena, Chile).

¿Qué importancia tiene el trabajo del geólogo en las explotaciones mineras?

Como ya se ha dicho, la mayoría de los objetos que caracterizan el estado del bienestar están hechos de minerales y, sin ellos, no seria posible la vida moderna, tal y como la conocemos ahora. También se han puesto ejemplos de casos en que la explotación minera sin la intervención del geólogo hubiera cerrado. Por lo tanto, debido a que en la minería moderna el geólogo primero descubre el yacimiento y más tarde aporta el conocimiento sobre sus características intrínsecas **el trabajo del geólogo es fundamental en las explotaciones mineras.**

¿Qué debe de saber el geólogo que trabaja en minería?

Es evidente que un geólogo que trabaje en exploración minera debe ser un especialista en la geología de los yacimientos que busca y lo más importante es que esté familiarizado con las características por las cuáles un yacimiento puede ser reconocido como explotable. Casi siempre, estas peculiaridades están asociadas con relaciones geológicas sencillas; estratigráficas, estructurales, existencia de alteraciones etc., pero requieren adecuaciones específicas de los métodos y procesos de investigación y evaluación en función de cada tipo de yacimiento, para su perfecta comprensión.

Fig. 9. Geólogos en el Salar de Atacama, en las cercanías de las explotaciones de sales de litio.

Los "hechos" obtenidos como resultado de la observación y el laboratorio son mucho más útiles que cualquier teoría metalogenética, y, solamente, el perfecto entendimiento de las características geológicas y de los resultados de los métodos de investigación usados en cada caso, permitirán una mayor eficacia en la búsqueda de nuevos yacimientos similares.

El profesional que trabaja en la geología económico-minera (Fig. 9) se ve obligado de manera casi rutinaria a aventurar estimaciones sobre el potencial de cualquier tipo de yacimiento, lo que le permitirá, con frecuencia, abarcando áreas de conocimiento no consideradas estrictamente geológicas, clasificar en términos económicos el objetivo de exploración, el cual variara ampliamente de acuerdo con la política de cada empresa.

J.D. Lowell, uno de los geólogos de exploración más exitosos del mundo resume las características que debe tener un geólogo de exploración minera en los siguientes términos:

- Debe ser una persona inteligente, con una buena experiencia y background académico.
- Tiene que ser capaz de pensar de manera "crítica" y, si es necesario, rechazar lo que piensan otros colegas suyos.
- Debe ser, como señalábamos, una persona con sólidos conocimientos geológicos, pero al mismo tiempo, no ser un pedante atenazado por el miedo a equivocarse, ya que su negocio consistirá en "equivocarse la mayor parte del tiempo".
- Cuando habla de sólidos conocimientos geológicos, Lowell quiere decir que un geólogo de exploración debe ser capaz de manejar diversas técnicas (por ejemplo):
- Deber ser capaz de producir buenos mapas geológicos, a veces en condiciones rudimentarias de trabajo.

- Para ello deberá tener unos sólidos conocimientos de geología estructural, petrografía, etc. Esto no significa que tenga que ser un "especialista" en estas técnicas.
- Importante: deberá ser capaz de crear hipótesis de trabajo.
- Deberá tener conocimientos de economía, especialmente si trabaja en un nivel senior.
- Deberá ser capaz de entender de transacciones de propiedades, el status de los terrenos, negociar transacciones, etc.
- Deberá ser un poco "masoquista", con deseos de subir montañas y vivir en sitios desagradables (pocas veces la exploración toma lugar cerca de ciudades o de la "civilización").
- Deberá tener una familia que comprenda su trabajo.
- Pero, sobre todas las cosas, deberá tener un compromiso absoluto con la idea de descubrir nuevas mineralizaciones.

Con el tiempo y la práctica de asumir algún tipo de riesgo al manifestar opiniones, se acaba por poner a punto una sofisticada técnica de estimación, cuya teoría acaba asimismo dominándose a fuerza de abrir los ojos, los oídos y sobre todo la mente, a métodos de trabajo y lenguajes propios de equipos multidisciplinares.

A continuación se incluyen algunas de las tareas que desarrolla un geólogo especializado en minería:

- Cartografía geológica, testificación de sondeos, elaboración de bases de datos e interpretación geológica
- Elaboración y supervisión de contratos de campañas de sondeos
- Gestión de programas de exploración
- Estimación de reservas y recursos. Empleo de programas de ordenador
- Auditoria de estimaciones de reservas y recursos
- Evaluación y valoración de propiedades mineras
- Geología estructural y exploración geológica
- Estudios de Evaluación del Impacto Ambiental (Fig. 10)
- Proyectos de restauración del espacio afectado por las explotaciones mineras

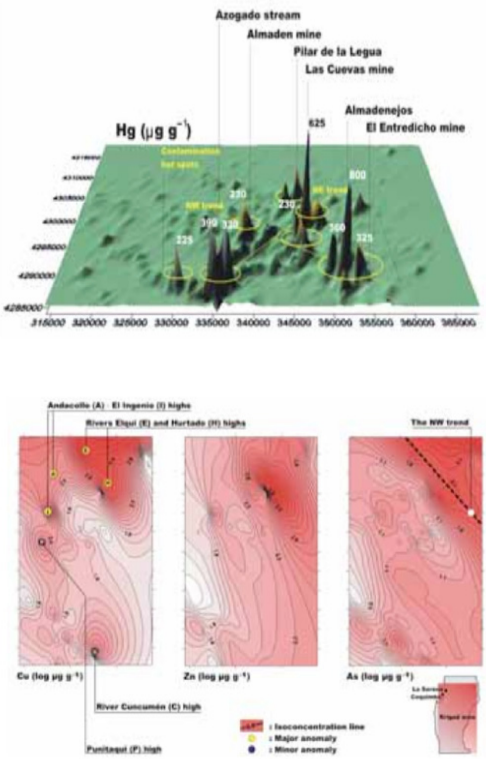

Fig. 10. Dos ejemplos de modelización de la dispersión de metales pesados en sedimentos fluviales mediante kriging. Arriba el distrito minero de mercurio de Almadén (España); abajo cuencas hidrográficas en el norte de Chile con importante minería de Cu-Au.

¿Cuántos geólogos trabajan en el campo de la minería?

El empleo en minería metálica y de rocas y minerales industriales en España ha venido descendiendo paulatinamente en los últimos años según las cifras proporcionadas por el Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de España.

En el año 1992, trabajaban en este campo un 25,5% del colectivo colegiado en activo. Sin embargo, ya en el año 2002, trabajaban en minería un 17,9% y habían elegido especializarse en este campo en sus estudios universitarios un 3,41% .

En el año 2018, trabajan en el campo de la minería metálica y de las rocas y minerales industriales sólo un 2% de los colegiados del ICOG. Por lo que se refiere a la especialidad de licenciatura, se han especializado en este campo un 5%.

¿Qué puestos de trabajo desempeñan los geólogos en este campo?

Se puede decir que prácticamente todos, desde geólogos junior hasta directores de los Departamentos de Geología e incluso directores de las empresas.

Aquí hay una diferencia entre España y los países anglosajones e iberoamericanos, países estos últimos donde los geólogos están mucho más valorados y son responsables de grandes decisiones empresariales.

¿Qué deficiencias de formación se detectan a la hora de enfrentarse al trabajo?

Fundamentalmente falta de adaptación de los planes de estudio al mercado de trabajo. Ya hemos comentado genéricamente antes qué conocimientos se necesitan para trabajar en este campo, pues sobre todo las técnicas especificas generalmente no se conocen, con lo que en el postgrado o más bien en la empresa hay que aprenderlas, lo que supone un esfuerzo de formación adicional, coste económico para la empresa y de tiempo para los técnicos.

En ese sentido un geólogo especialista en minería debería tener la siguiente formación:

Bachillerato

Durante el bachillerato, el futuro estudiante de geología, además de estudiar las asignaturas de ciencias, matemáticas e informática debe disponer de habilidades en relaciones humanas y oratorias y, si es posible, incluir en su formación algo de ciencias ambientales y microeconomía. Los futuros geocientíficos deben desarrollar unas especiales habilidades de observación y tener mucha curiosidad ya que su futuro trabajo geológico o en el laboratorio requerirá desarrollar especialmente esas facetas.

Otro aspecto del bachillerato que no debe descuidarse es el de los idiomas. El mundo de la minería mundial es mucho más vasto que el del nacional, y las oportunidades de empleo se multiplican infinitamente si se sabe inglés y francés. En especial, las multinacionales del sector que trabajan en todo el mundo, fundamentan su proceso de selección en la titulación académica y la experiencia profesional pero sobre todo en el conocimiento de idiomas. Además, la mayor parte de la bibliografía científico-técnica geológica y minera está en inglés. Hay que terminar el bachillerato hablando al menos otro idioma (tal y como se supone está previsto) pero muy especialmente el inglés.

Universidad

En España existen actualmente seis universidades que imparten la carrera de geología (Granada, Salamanca, Madrid, Barcelona (2) y Oviedo). La mayor parte de los planes de estudio incluyen alguna especialidad en recursos minerales. Para un especialista en esta especialidad, la carrera más adecuada debería incluir durante los dos primeros años asignaturas básicas como física, química, cálculo estadístico, informática, trigonometría, geometría en 3D y macroeconomía, además de las asignaturas tradicionales de los dos primeros cursos. Durante los dos últimos años de la carrera los tres actuales, se deberían hacer/adquirir:

- Sólidos conocimientos de geología general que incluyan cursos de mineralogía, petrografía sedimentaria, ígnea y metamórfica, geología estructural y geoquímica.
- También es fundamental la realización de trabajos de campo (cartografía básica y aplicada) en diferentes tipos de terrenos geológicos y, sobre todo, prácticas ("reales") en empresas durante el verano.
- Cursos de introducción a la geofísica, geoestadística, hidrogeología, sedimentología, y estratigrafía.
- Cursos de introducción a los yacimientos minerales, la minería, metalurgia, geopolítica, economía y geología ambiental.

Aunque no sea una asignatura de la carrera, para un geólogo que va a dedicarse a la industria minera, conviene mantenerse en buena forma física, por lo que hacer algún tipo de deporte es también recomendable para preparase para un futuro empleo viajero y de campo.

Cada vez más las empresas (a escala mundial) piden que los geólogos a contratar tengan además de la licenciatura (grado según el plan actual), un master o un doctorado.

Si el aspirante se decide a realizar un master, se debe escoger uno que lo imparta una facultad que, de algún modo, este especializada y tenga una amplia experiencia de trabajo en colaboración con las empresas mineras (investigación, desarrollo y consultoría).

En el caso de pretender especializarse en geología de minas, la facultad o escuela debe disponer de cursos de minería, metalurgia extractiva, geoestadística y cálculo de reservas, ingeniería ambiental, diseño y cálculo de voladuras, etc.

En todo caso los mejores geólogos de exploración que han descubierto nuevos yacimientos son aquellos que han trabajado en una mina o cantera, al menos, un par de años.

Actualmente, hay ya en marcha varios másters en España en el campo de los recursos minerales.

La Facultad de Ciencias Geológicas de Madrid ofrece el **Máster Universitario en Exploración de Hidrocarburos y Recursos Minerales.** Este máster incide en uno de los aspectos más aplicados de la geología, como es la exploración de recursos geológicos, con el objetivo de reforzar el enfoque profesional de los estudios de posgrado y aumentar la empleabilidad de los egresados (https://geologicas.ucm.es/master-universitario-en-exploracion-de-hidrocarburos-y-recursos-minerales).

La Universidad de Oviedo ofrece 25 plazas en el **Master Oficial en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica** (http://cei.uniovi.es/postgrado/masteres/visor/-/asset_publisher/xK3t/content/master-universtitario-en-recursos-geologicos-e-ingenieria-geologica;jsessionid=681EDA492208273ABF2C80A93B7DE463) , un curso de 18 meses con cinco módulos obligatorios de 90 créditos ECTS (Cartografía Geológica (6 ECTS), Cristalografía y Mineralogía (4 ECTS), Dinámica Global y Geología Estructural (4 ECTS), Geomorfología (4 ECTS), Estratigrafía (4 ECTS), Paleontología (4 ECTS), Petrología y Geoquímica (4 ECT) y una tesis de master de 30 créditos.

La Universidad de Zaragoza ofrece 30 plazas en un **Máster Universitario en Geología: Técnicas y Aplicaciones** (https://estudios.unizar.es/estudio/ver?id=686&anyo_academico=2018) que consta de un mínimo de 60 ECTS, de los cuales 12 corresponden al trabajo de Fin de Master y 48 a las asignaturas programadas del Máster.

La Universidad de Huelva y la Universidad Internacional de Andalucía, ofrecen el **Máster Universitario Oficial en Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales** (http://uhu.es/recursosminerales/) de 60 créditos ECTS de los cuales 10 corresponden al trabajo de fin de Master. El máster está organizado en seis módulos: Métodos y Técnicas. Mineralogía, Petrología y Geoquímica. Geología Aplicada. Yacimientos Minerales. Análisis y Gestión Ambiental y Materias Transversales.

La Universidad de Granada nos ofrece el **Máster en Geología aplicada a los recursos minerales y energéticos (GEOREC)** (http://masteres.ugr.es/mastergeologia/) de 111 créditos ECTS de los que el alumno tiene que cursar 60 con los siguientes módulos: Técnicas y métodos instrumentales generales (12 OBLIG), Técnicas y métodos instrumentales específicos (18 OPT), Recursos minerales (24 OPT), Recursos energéticos (27 OPT), Legislación (3 OBLIG), Ampliación de formación (15 OPT), Prácticas externas (6 OPT), Trabajo Fin de Máster (TFM) (6 OBLIG).

La Universidad de Barcelona ofrece 25 plazas en el Máster de Recursos Minerales y

Riesgos Geológicos (http://www.ub.edu/estudis/mastersuniversitaris/recursosminerals/), de 60 créditos ECTS y los siguientes contenidos para la especialidad de geología y modelización de depósitos minerales: SIG (2,5 OBLIG), Teledetección (2,5 OBLIG), Riesgos asociados a los materiales (5 OBLIG), Modelos de yacimientos minerales (2,5 OBLIG), Prospección geoquímica, geofísica y sondeos (2,5 OBLIG) , Métodos de caracterización mineralógica y geoquímica (2,5 OBLIG), Geodinámica y Metalogenia (2,5 OBLIG), Análisis de yacimientos minerales (2,5 OBLIG), Evaluación de yacimientos minerales (2,5 OBLIG), Modelos de equilibrio (2,5 OBLIG), Fluidos en la corteza (2,5 OBLIG), Magmas y Depósitos Minerales (2,5 OBLIG), Trabajo de Campo (2,5 OBLIG), Diagénesis y metamorfismo (2,5 OBLIG), Deformación frágil y dúctil (2,5 OBLIG). Trabajo Final de Máster (20 OBLIG).

Además, a nivel mundial son recomendables:

Global Management of Natural Resources MSc impartido por la Universidad Global de Londres (https://www.ucl.ac.uk/prospective-students/graduate/taught-degrees/global-management-natural-resources-msc).

El Máster en Recursos Minerales de la Universidad de St Andrew (https://www.st-andrews.ac.uk/subjects/earth-environmental-sciences/mineral-resources-msc/) en Escocia.

Máster en Geociencias de la University of Western Australia: http://www.science.uwa.edu.au/courses/postgrad/coursework/master-geosci.

Máster Mineral Resources and Sustainable Mining, Universidad de Oulu (Finlandia) (https://studyinfo.fi/app/#!/korkeakoulu/1.2.246.562.17.62258456417)

Máster en Recursos Minerales de la Universidad de Queensland en Australia (https://future-students.uq.edu.au/study/program/Master-of-Mineral-Resources-5196).

Oportunidades de empleo

La industria minera mundial se encuentra hoy en un proceso de expansión. Sin embargo, cada vez hay menos geólogos especialistas en este campo a nivel mundial, debido al rechazo social que sufre la minería. Por ello, las oportunidades de empleo son cada vez mayores a nivel mundial. En España, la minería sigue creciendo a pesar de las dificultades y cada vez son más empresas (en particular las multinacionales en el campo de la minería metálica y muy particularmente en el de los minerales industriales) que comprenden las ventajas de disponer de geólogos o departamentos de geología en sus canteras y minas.

El aumento de los precios de los metales hace que hoy la exploración esté creciendo globalmente en especial para profesionales que dominen idiomas ya que la oferta para trabajar en el extranjero es muy amplia.

La satisfacción de haber encontrado un yacimiento y de llegar a ponerlo en explotación, o como en algunos casos, hacerse rico gracias a participar en la empresa (ahora son muy frecuentes las *junior exploration companies,* que cotizan en bolsa) es una parte considerable del orgullo de pertenecer a esta profesión de vocación multinacional. En muchas ocasiones, los geólogos mineros o de exploración que han tenido éxito en sus empresas como empleados pasan al negocio de la consultoría privada para asesorar a propietarios de fincas, empresas mineras e instituciones gubernamentales.

Otro nicho de empleo emergente es el de investigadores científicos relacionados con los recursos minerales. En España, el Instituto Geológico y Minero de España o el CIEMAT, convocan regularmente plazas de investigadores (para doctores) y técnicos especialistas (para licenciados) en estos campos. También las Universidades y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas convocan plazas de profesores o investigadores (sólo para doctores) dentro de los departamentos cuyas áreas de conocimiento se relacionan con los recursos minerales. Muchas empresas mineras ofrecen puestos de trabajo para este tipo de investigadores, bien en plantilla o en colaboraciones puntuales.

Otro aspecto importante para un profesional de la geología de minas es participar en organizaciones científicas y profesionales de su sector. En España, el ejercicio de la profesión está regulado y para ejercerla es preciso colegiarse en el Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (www.icog.es) o, si existe, en el Colegio Autonómico correspondiente.

A nivel europeo, los colegios o asociaciones profesionales nacionales están agrupados en la Federación Europea de Geólogos (https://eurogeologists.eu/), que coordina los esfuerzos internacionales en, por ejemplo, los Códigos Internacionales de declaración de Reservas y Recursos a efectos de la valoración de empresas mineras en la bolsa.

Entre las organizaciones científicas nacionales e internacionales relacionadas con los recursos minerales son de destacar:

Internacionales

Society of Economic Geologists (http://www.segweb.org/)
National Resources Governance Institute (https://resourcegovernance.org/)
Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards (http://www.crirsco.com/welcome.asp)

International Minerals & Mining association (https://www.iom3.org/international-mining-minerals-association)
Australiasian Institute of Mining and Metallurgy (http://www.ausimm.com.au/)
American Institute of Professional Geologists (http://www.aipg.org/)
Association of Applied Geochemists (http://www.appliedgeochemists.org/index.html)
Canadian Institute of Mining and Metallurgy (http://www.cim.org/)
World Gold Council (https://www.gold.org/)
Global Mining association of China (http://www.globalminingchina.com/web/index.php/en/)
National Mining Association (https://nma.org/)
International Council of Mining and Metals (http://www.icmm.com/)
Mineral Council of Australia (http://www.minerals.org.au/)
Society for Geology Applied to Mineral Deposits (http://www.e-sga.org/)
The Society for Mining, Metallurgy and Exploration (http://www.smenet.org/)
Mineralogical Association of Canada (http://www.mineralogicalassociation.ca/)
Environmental Mining (http://www.mininglife.com/news/mine_environmental_news.asp)

Europeas

Euromines (http://www.euromines.org/)
Industrial Minerals Association of Europe (http://www.ima-eu.org/http://www.ima-eu.org/)
Eurogypsum (http://www.eurogypsum.org/)
European Aggregates Association (http://www.uepg.eu/)
European & International Federation of Natural Stone Industries (http://www.euroroc.net/)
European Lime Association (https://www.eula.eu/)
Europan Cement Association (https://cembureau.eu/)
European Association of Industrial Silica Producers (https://www.eurosil.eu/about-eurosil)

Españolas

Confederación de Industrias Extractivas de Rocas y Minerales Industriales (COMINROC) (http://www.cominroc.es/pagina.html?pagina=0)
Asociación Nacional de Industrias Extractivas y Afines (http://www.aindex.org/)
Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España (ANCADE) (http://www.ancade.es/)

Federación de Áridos (http://www.aridos.info/)
Asociación Española de Fabricantes de Ladrillos y Tejas de Arcilla Cocida (http://www.hispalyt.es/es)
Clúster de la Pizarra de Galicia (https://clusterdapizarra.com/)
Clúster de la Piedra Natural (http://clusterpiedra.com/)
Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (https://www.oficemen.com/)
Clúster de la Pizarra de Galicia (https://clusterdapizarra.com/)
Clúster de la Piedra Natural (http://clusterpiedra.com/)
Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (https://www.oficemen.com/)

¿El futuro?

En la minería se van a seguir demandando profesionales en unas cifras similares o mayores a las que existen en la actualidad, ¡pero dónde!: la aldea global; Internet en la búsqueda del empleo. ¿Estas dispuesto/a a dejar tu familia, tus amigos, la vida fácil y enfrentarte a ti mismo?

Para saber más:

GEMM (2018) Grupo de Estudios en Minería y Medio Ambiente. http://www.uclm.es/users/higueras/ portal_gemm/Portal.htm

Oyarzun, R. 2011. Introducción a la Geología de Minas. Ediciones GEMM - Aula2puntonet, http://www.aulados.net/ GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html

Oyarzún, J. & Oyarzun, R. 2011. Minería Sostenible: Principios y Prácticas. Ediciones GEMM - Aula2puntonet, http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html

Oyarzun, R., Higueras, P. & Lillo, J. 2011. Minería Ambiental: Una Introducción a los Impactos y su Remediación. Ediciones GEMM - Aula2puntonet, http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/ index_libros.html

Lillo, J. & Oyarzun, R. 2013. Geología Estructural Aplicada a la Minería y Exploración Minera: Principios Básicos. Ediciones GEMM - Aula2puntonet, http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/ index_libros.html

Oyarzun, J. & Oyarzún, J. 2014. Léxico de Geología Económica: Términos de Uso Común en España e Iberoamérica. Ediciones GEMM - Aula2puntonet, http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html

Wikipedia (2018) Micromagament. https://en.wikipedia.org/wiki/Micromanagement

InfoMine. Mining Intelligence & Technology. http://www.infomine.com/

Regueiro, M. y Marchán, C. La industria española de las rocas y minerales industriales. http:// www. ucm.es/info/crismine/Rocas_Minerales_Ind_Regueiro.pdf

El geólogo en la Ingeniería Geológica

Jose Alberto López Chinarro
Subdirector en Orbis Terrarum Projects

Para qué sirve la Ingeniería Geológica

La Ingeniería Geológica es la ciencia aplicada al estudio y solución de los problemas de la ingeniería y del medio ambiente producidos como consecuencia de la interacción entre las actividades humanas y el medio geológico. Se ocupa de la aplicación de las Ciencias Geológicas a la práctica de la ingeniería con el fin de asegurar que los factores geológicos que afectan a la ubicación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de las obras de ingeniería sean siempre identificados y tenidos en cuenta adecuadamente, así como evitar o mitigar las consecuencias de los riesgos geológicos.

Por tanto, la Ingeniería Geológica es la disciplina que aplica los datos, técnicas y principios geológicos al estudio de los materiales geológicos naturales (tipo roca y suelo), de los fluidos superficiales y subsuperficiales (aguas superficiales y freáticas), y analiza la interacción de los procesos geológicos de manera que los factores que afectan a la planificación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de las obras de ingeniería sean reconocidos, interpretados y representados adecuadamente para su empleo en ingeniería.

El geólogo de Ingeniería Geológica o ingeniero geólogo utiliza su formación geológica, sus conocimientos en ingeniería y su experiencia para proporcionar información geológica cuantitativa y recomendaciones adecuadas para el diseño. Los ingenieros

geólogos necesitan identificar las condiciones de la roca y el suelo en un emplazamiento y anticipar los riesgos naturales para que las estructuras puedan ser diseñadas, construidas y explotadas de manera segura y económica.

El trabajo que realiza

Los ingenieros geólogos constituyen una alta proporción de geólogos profesionales en todo el mundo. La mayoría de estos trabajos son de ingeniería civil, en empresas de consultoría o constructoras integrados en un equipo de ingenieros, algunos de los cuales se especializan en el campo de la ingeniería geotécnica, que se refiere a la interacción de las estructuras con el terreno.

La Ingeniería Civil es el campo en el que, tradicionalmente, más se ha desarrollado la labor del ingeniero Geólogo. Es un sector muy diversificado en el que se pueden distinguir un gran número de actividades, tales como:

- Obras lineales: carreteras, ferrocarriles, viaductos, puentes…
- Obras subterráneas: túneles, galerías, cavernas, pozos, zanjas.
- Obras hidráulicas, portuarias y marinas: presas, azudes, balsas, estanques, canales, colectores, dársenas, diques, estructuras off-shore…
- Obras residenciales: edificaciones, viviendas…
- Construcción de plantas industriales y de energía…

Todas estas actividades tienen una incidencia directa en el medio geológico, por lo que la labor del ingeniero geólogo es fundamental para la planificación, estudio y construcción de cada una de ellas, así como para asegurar el correcto funcionamiento de las infraestructuras durante su periodo de vida útil.

Son muchas las actividades que el ingeniero Geólogo puede realizar en este campo. A continuación se indican algunas de las más habituales:

- Recopilación y análisis de información previa. Esta información, que puede ser geológica, geotécnica, hidrogeológica, permite al ingeniero Geólogo establecer el medio geológico en el que se desarrollará la infraestructura, los condicionantes que puede suponer para el proyecto y realizar un diseño de la campaña de investigación geológico-geotécnica.

- Diseño y supervisión de la campaña de investigación geológico-geotécnica y de ensayos in situ para poder identificar las distintas unidades geológicas presentes en la zona de estudio, conocer sus características geomecánicas y para poder realizar un

modelo geológico del emplazamiento.

- Cartografía geológica. Ligado a lo anterior, el ingeniero Geólogo ha de realizar cartografías geológicas de la zona donde se desarrolla el proyecto, haciendo hincapié en los aspectos geomorfológicos y de posibles riesgos geológicos que puedan afectar al proyecto y que deben ser solventados.

- Diseño de la campaña de ensayos de laboratorio y control de calidad de materiales de origen geológico obtenidas en la campaña de investigación geológico-geotécnica.

- Realización de una caracterización geotécnica de cada una de las unidades geológicas presentes en el área de estudio y que tengan incidencia en el proyecto. En esta caracterización, se asignan valores numéricos a las principales características de los materiales en términos de identificación, estado, resistencia, deformabilidad, permeabilidad…

- Realización de un modelo geológico-geotécnico del terreno, integrado con la estructura de ingeniería civil proyectada, que se puede analizar numéricamente para asegurar que se cumplen los criterios de tolerancia definidos para el proyecto. Los modelos deben contener y caracterizar todos los elementos importantes del emplazamiento.

- Diseño de sistemas de instrumentación y auscultación del terreno así como la interpretación de los datos obtenidos para hacer una predicción del comportamiento del terreno.

- Estudio y recomendación del aprovechamiento y/o reutilización de los materiales geológicos presentes en la zona del proyecto y que deben ser excavados para ejecutar las estructuras proyectadas.

- Definición de la excavabilidad de los materiales geológicos que han de ser excavados en el proyecto y recomendación y selección de los métodos de excavación más adecuados.

- Identificación y recomendación de soluciones constructivas en Ingeniería Geológica como cimentaciones, tratamientos del terreno, estabilidad de taludes y laderas, excavación de túneles y galerías, construcción de rellenos, drenaje de masas de tierra…

- Redacción de informes y proyectos de construcción de:

- Estructuras de cimentación
- Estructuras de contención del terreno
- Obras de tierra: desmontes, taludes, laderas, rellenos, terraplenes…
- Excavaciones subterráneas y túneles
- Drenaje y sistemas de achique de agua en excavaciones
- Regeneración de playas y costas
- Control de la erosión
- Tratamientos de mejora y refuerzo del terreno

Los conocimientos que aporta

Son muchas las ventajas que aporta un ingeniero geólogo a un proyecto de ingeniería. Se incluyen, a continuación, algunas de las más importantes.

Geología

En primer lugar, un geólogo de Ingeniería Geológica aporta su conocimiento en Ciencias de la Tierra debido a su formación geológica. Esto le permite identificar los suelos y rocas mediante un examen visual e interpretar la historia y la estructura geológica de un emplazamiento. Además, identifica los riesgos geológicos que pueden afectar al proyecto.

También utiliza su conocimiento de los procesos geomorfológicos y es capaz de interpretar las características del terreno y las condiciones hidrogeológicas. Ligado a esto, tiene amplios conocimientos en el origen y formación de depósitos cuaternarios que son sobre los que más habitualmente se desarrollan los proyectos de ingeniería.

Ingeniería geológica e hidrogeología

El ingeniero geólogo dispone de una serie de conocimientos específicos que son de gran utilidad en el desarrollo de cualquier proyecto de ingeniería, como son:

- Métodos y técnicas de investigación del subsuelo para que un emplazamiento pueda ser caracterizado de la manera más completa y rentable.
- Métodos descripción y clasificación de suelos y rocas para su empleo en ingeniería.
- Conocimiento de las propiedades de los suelos y rocas, como la resistencia, la permeabilidad y deformabilidad, incluyendo cómo medir estos parámetros en el laboratorio y en el campo y la forma de aplicarlos a gran escala a los modelos geológicos.
- Conocimiento de los procesos de meteorización y la naturaleza de las rocas meteorizadas.
- Naturaleza, origen y propiedades físicas de las fallas y discontinuidades.

- Hidrogeología: infiltración de agua, conductividad hidráulica. También la presión del agua en el suelo y técnicas de drenaje y agotamiento.
- Los factores geológicos clave que pueden afectar a los proyectos de ingeniería, tales como tensiones, terremotos, vibraciones, reacciones químicas y meteorización.

Ingeniería civil. Diseño y práctica

Un ingeniero geólogo conoce los principios del diseño de diversas estructuras, (por ejemplo para la cimentación de un edificio o para la construcción de un túnel) tiene un conocimiento considerable de ingeniería práctica, así como de la terminología específica que se emplea. Las condiciones geológicas del terreno necesitan ser modelizadas (geomecánicamente en muchos casos) y es el ingeniero Geólogo el que proporciona modelos geológicos adecuados que pueden ser analizados para predecir el desarrollo del proyecto.

Mecánica de suelos y rocas

El conocimiento de los principios y la práctica de la mecánica de suelos y rocas es importante para el ingeniero Geólogo. Esto incluye el comportamiento a tracción y compresión y la permeabilidad de los materiales geológicos a pequeña y gran escala, el principio de las tensiones efectivas, los cambios inducidos por deformación, los estados críticos y la dilatación de las masas de suelo y roca.

Este conocimiento permite al ingeniero geólogo realizar una correcta caracterización numérica de las propiedades de los materiales geológicos, modelizar geológica y geotécnicamente el proyecto y analizar estos modelos según los objetivos del proyecto.

Reutilización de los materiales geológicos

El conocimiento de las propiedades de los distintos materiales geológicos permite al ingeniero Geólogo analizar y recomendar o descartar la reutilización de materiales que han de ser excavados en otras unidades de obra, como en la construcción de obras de tierra o en capas específicas de obras lineales (carreteras, plataformas de ferrocarril…).

Herramientas que utiliza

Existe una gran variedad de herramientas con las que el ingeniero geólogo desarrolla su actividad. Estás herramientas van desde las más tradicionales hasta las más sofisticadas.

En primer lugar, el ingeniero geólogo debe conocer el objetivo del proyecto para el que va a trabajar y las implicaciones que puede tener en cuanto a excavaciones, movimiento

de tierras, construcción de estructuras… Por ello, es norma habitual que le sean facilitados planos con un detalle suficiente del proyecto a ejecutar. Así mismo, es muy importante que esos planos incluyan una base topográfica, cuya extensión sobrepase los límites del proyecto.

Una vez conocido el proyecto y los condicionantes del mismo, el ingeniero geólogo utiliza la bibliografía geológica y temática disponible y que pueda ser relevante para su actividad. Esta bibliografía incluye informes geológicos y geotécnicos previos en la zona de estudio, cartografía temática (geológica, geotécnica, hidrogeológica…), fotografía aérea (incluso ortofoto e imágenes de satélite), bases de datos de sondeos, etc… Toda esta información, bien analizada, permite al ingeniero geólogo hacer una buena composición inicial de la zona donde va a desarrollar su proyecto, le permite diseñar la campaña de investigación y facilita la labor de cartografía geológica en campo. Por tanto, el ingeniero geólogo debe saber no sólo emplear esta información sino tener además la habilidad y el conocimiento para encontrar dicha información.

Una vez planificada la campaña de investigación, el ingeniero Geólogo está listo para realizar el trabajo de campo. Este trabajo de campo suele incluir la supervisión y coordinación de la campaña de investigaciones (mediante sondeos, calicatas, penetrómetros, etc.) y de ensayos *in situ* (para determinación de resistencia, deformabilidad, permeabilidad…). Según el objetivo del proyecto, (geológico, geotécnico, hidrogeológico o ambiental) debe realizar una descripción específica de los materiales atravesados por las investigaciones tomando, además, fotografías de todo ello y seleccionar las muestras más representativas del terreno para su posterior ensayo en laboratorio. Además, la presencia del ingeniero geólogo en campo permite hacer ajustes en la campaña según lo considere a la vista de los resultados que se vayan obteniendo, (p.e. intensificando el muestreo o variando la longitud final de perforación).

Además de las investigaciones con maquinaria, en campo, el ingeniero geólogo debe hacer otro tipo de trabajo mucho más tradicional pero no por ello menos efectivo, como es el de hacer un buen recorrido de la zona de estudio para realizar una cartografía geológica en la que se representen los factores más importantes que afectan al proyecto, como son la distribución de los materiales geológicos en el área de la zona de estudio, la representación de los riesgos geológicos, la presencia de puntos de agua, rasgos geomorfológicos y estructurales de interés, etc. Toda esta representación se hace sobre los planos topográficos facilitados, de manera que la representación del proyecto pueda superponerse a la cartografía realizada, lo que dará una buena idea de la afección del proyecto al medio geológico.

Finalmente, en campo, el ingeniero geólogo debe realizar estaciones de observación

geológica representativas para la toma de datos geológicos y estructurales. Para esta actividad, se suelen emplear elementos tan útiles y sencillos como la brújula (para medir orientaciones de discontinuidades), el martillo de geólogo (para determinar la resistencia de la roca) y cinta métrica para medir espesores y longitudes representativas.

De vuelta al gabinete, el ingeniero geólogo selecciona los ensayos más adecuados para las muestras tomadas durante la campaña de investigación y se lo comunica al laboratorio, con el que suele tener una comunicación directa.

Una vez completadas todas estas fases comienza el trabajo de interpretación y análisis de los resultados de las campañas de campo y de laboratorio.

En primer lugar el ingeniero geólogo identifica las distintas unidades geológicas que afectan al proyecto de ingeniería y asigna valores numéricos a sus características más representativas (granulometría, plasticidad, humedad, densidad, resistencia, deformabilidad, permeabilidad…) en un proceso que se conoce como caracterización geotécnica.

Una vez identificadas y caracterizadas las unidades geológico-geotécnicas, el ingeniero Geólogo hace una modelización de cómo se distribuyen estas unidades en el área del proyecto mediante la realización de plantas geológicas y perfiles representativos empleando las técnicas tradicionales de representación de la información geológica. Esta modelización suele representarse en formato digital en un software de representación gráfica, normalmente tipo CAD. Estos modelos incluyen, normalmente, el diseño del proyecto de ingeniería objeto de estudio, lo que permite observar la afección de dicho proyecto a la modelización geológica realizada.

Una vez realizada esta modelización, el ingeniero geólogo la utiliza para realizar cálculos específicos en función de los aspectos a verificar o de los problemas a resolver y que tienen una incidencia directa en la instalación y ejecución de las estructuras del proyecto de ingeniería. A continuación se indican algunos de los cálculos más habituales.

- Cimentaciones: recomendación de cimentación superficial, profunda o mixta. En el caso de cimentaciones superficiales ha de determinar la tensión admisible del terreno y los asientos asociados empleando la formulación más adecuada y teniendo en cuenta las cargas transmitidas y el punto de aplicación de las mismas en la cimentación. En el caso de cimentaciones profundas debe aportar parámetros geotécnicos de resistencia del terreno para el fuste y la punta de cimentación, definir la longitud de dicha cimentación y el sustrato donde queda alojada la punta inferior y ha de determinar los asientos asociados. Estos cálculos requieren de un conocimiento profundo de la mecánica de suelos y rocas,

de la ingeniería de cimentaciones y de los procesos constructivos. Los cálculos pueden realizarse manualmente, mediante hojas de cálculo o mediante software específico de cálculo y diseño de cimentaciones.

- Estabilidad de taludes: En este ámbito, se suele trabajar en dos vertientes principales:
  - Estudio de la estabilidad de un talud existente y, si es necesario, diseñar medidas de estabilización o refuerzo.
  - Estudio de la estabilidad de un talud que va a ser generado por excavación indicando la inclinación de excavación óptima y, si es necesario, diseñar medidas de estabilización o refuerzo.

Para realizar estos estudios, el ingeniero geólogo debe tener un amplio conocimiento de la ingeniería de taludes, conociendo los métodos de cálculo de estabilidad, el diseño de medidas estabilizadoras y de refuerzo, así como de los procesos constructivos de los taludes y de las medidas estabilizadoras. Estos cálculos suelen realizarse mediante un software específico de cálculo de estabilidad de taludes con métodos de equilibrio límite o, si el problema es más complicado, mediante un software de elementos finitos que permite evaluar el comportamiento tensodeformacional del talud a estudiar. El empleo con éxito de ambos tipos de software requiere haber hecho previamente una buena caracterización geotécnica y una correcta modelización geológico-geotécnica.

- Tratamientos del terreno: En algunos proyectos, las condiciones del terreno no cumplen con los requisitos de resistencia o deformabilidad que precisa el proyecto de ingeniería, por lo que se deben emplear técnicas de tratamiento del terreno que mejoren estas propiedades. Para ello, el ingeniero geólogo debe conocer las técnicas de tratamiento del terreno existentes, los fundamentos de cada una de ellas, el método constructivo y la metodología de cálculo necesaria para diseñar adecuadamente este tratamiento. Muchos de estos cálculos se realizan mediante hojas de cálculo preparadas por el propio ingeniero geólogo, aunque existen programas de ordenador específicos para algunas de las técnicas más habituales.

- Túneles y obras subterráneas: El ingeniero geólogo debe conocer los métodos de excavación que se emplean en las obras subterráneas, los métodos de refuerzo y sostenimiento de las secciones excavadas, el comportamiento tensodeformacional del medio geológico donde se realiza la excavación, la influencia de las discontinuidades geológicas (fallas, diaclasas), la hidrogeología del medio y muchos otros aspectos. Para ello, el ingeniero realiza modelizaciones con programas específicos (métodos de equilibrio límite, elementos finitos, diferencias finitas…) que permiten modelizar las secciones de excavación y el comportamiento que sufre el medio geológico antes y después de la

excavación, así como el efecto del refuerzo y del sostenimiento.

Con qué profesionales se relaciona

Debido a los distintos ámbitos en los que desarrolla su actividad, el ingeniero geólogo trabaja habitualmente con una gran variedad de profesionales.

En el ámbito de la ingeniería civil, el ingeniero geólogo se relaciona, obviamente, con ingenieros civiles que, en muchos casos son los proyectistas de las infraestructuras a construir y que necesitan conocer la influencia que tendrá el medio geológico en dicha infraestructura. A nivel mucho más especializado, y según la complejidad del problema a tratar, tiene una estrecha relación con ingenieros geotécnicos, especializados en las interacciones entre el terreno y la estructura.

Cuando su trabajo se desarrolla en fase de obra, la relación se amplía a muchos otros gremios, como son los topógrafos, los encargados de obra y los operarios de la maquinaria de excavación o perforación, especialmente cuando su labor es la de solucionar un problema asociado con el terreno que requiere de soluciones más o menos rápidas y, en ocasiones, prácticamente inmediatas.

En el ámbito de la edificación, los ingenieros geólogos suelen relacionarse con arquitectos y con promotores que necesitan conocer la solución y las recomendaciones de cimentación de las edificaciones proyectadas.

Cuando los proyectos son de plantas de energía e industria los principales interlocutores son ingenieros especializados en energía (ingenieros de minas y civiles) e ingenieros industriales. En estos casos, la labor del ingeniero geólogo es también muy importante para definir las soluciones de cimentación, caracterizar el terreno en cuanto a sus parámetros estáticos y dinámicos, sectorizar áreas con distinto comportamiento geotécnico, etc…

En prácticamente todos los proyectos en los que participa el ingeniero geólogo hay una fase de investigación del terreno. Cuando se trata de diseñar y supervisar estas campañas de investigación la comunicación directa suele ser con los responsables de las empresas de maquinaria de perforación y con el personal de perforación. Si hay que hacer ensayos in situ, la relación es con los responsables técnicos de dichas empresas y con el personal técnico que realiza el trabajo. En el caso de requerirse ensayos geofísicos, la relación es con los responsables y el personal técnico de la empresa que va a ejecutar dichos ensayos.

En muchos casos, los responsables de estas empresas (de prospección, de geofísica y de ensayos in situ) son compañeros geólogos.

Complementando a la fase de investigación del terreno, suele realizarse una campaña de ensayos de laboratorio. La relación en este caso suele ser con los técnicos de laboratorio en los que las titulaciones pueden ser mucho más diversas, aunque mayoritariamente suelen ser químicos y, también, geólogos.

¿Quiénes son sus principales clientes?

Los clientes para los que trabaja el ingeniero geólogo pertenecen tanto al sector público (administraciones), como al sector privado.

Sector público

En este ámbito se incluyen todas las Administraciones Públicas que promueven la planificación construcción de infraestructuras de ámbito nacional. En este caso suelen ser Ministerios como los de Fomento y Medio Ambiente u organismos directamente dependientes de ellos como Confederaciones Hidrográficas los que licitan las nuevas infraestructuras o la mejora y rehabilitación de las existentes. Entre estas infraestructuras se pueden destacar las carreteras, autovías y autopistas, las líneas de ferrocarril convencional y de alta velocidad, las presas y embalses…

A nivel autonómico, los clientes suelen ser las propias administraciones autonómicas las que promueven infraestructuras dentro del ámbito de la Comunidad Autónoma, normalmente a través de las consejerías.

Finalmente, a nivel local, suelen ser los ayuntamientos municipales los que promueven nuevas infraestructuras enmarcadas normalmente dentro de los planes de ordenación urbana.

Sector privado

En este ámbito los clientes se diversifican muchísimo ya que prácticamente cualquier empresa privada que tenga que realizar algún proyecto que tenga influencia sobre el terreno precisará de un estudio realizado por un técnico competente, en este caso, un geólogo de ingeniería geológica.

Así, en el ámbito de la edificación, los principales clientes son las empresas promotoras y constructoras de vivienda.

Las empresas de energía, químicas o de hidrocarburos se convierten en clientes cuando deben construir nuevas instalaciones, ampliar las existentes, construir nuevas

conducciones subterráneas o aéreas…

Las empresas constructoras requieren los servicios del geólogo de ingeniería durante la fase de proyecto y durante la fase de construcción.

Las empresas consultoras o de ingeniería de proyectos son también clientes habituales del ingeniero geólogo ya que precisan de sus servicios para la realización de las campañas de investigación del terreno y, posteriormente, para la redacción de anejos de geología, geotecnia, aprovechamiento de materiales, necesarios en cualquier proyecto constructivo.

Referencias bibliográficas

AEG (1993) Professional Practice Handbook

Álvarez Manilla A. (2003) Geofísica Aplicada a los Proyectos de Ingeniería Civil

ANECA (2015) Libro Blanco del Título de Grado en Ingeniería Civil

ASBOG (2015) A Study of the Practice of Geology in the United States and Canada

Association of Geotechnical & Geoenvironmental Specialists (2006). AGS Guidelines for Good Practice in Site Investigation, 2p.

Bell, F.G. (2007). Engineering Geology, 2nd Edition. Elsevier.

Blyth, F. and de Freitas, M.H. (1984). A Geology for Engineers. Elsevier

Bureau of Reclamation (2001). Engineering Geology Field Manual. Vol. I. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation.

Bureau of Reclamation (2002). Engineering Geology Field Manual Vol. II. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation.

Clayton, C. R. I., Matthews M. C. and Simons, N. E. (1982). Site Investigation. Halsted Press.

FHWA (2001). Subsurface Investigations.

FHWA (2002). Evaluation of Soil and Rock Properties.

FHWA (2003). Checklist and Guidelines for Review of Geotechnical Reports and Preliminary Plans and Specifications.

G-I-ASCE/xxx/AIPG Joint Task Force on Areas of Practice (JTFAP) (2012). Engineering and Geology Practice Guidelines.

González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuno, L. y Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. Prentice Hall.

Hencher, S. (2012). Practical Engineering Geology. Elsevier.

Hoek, E.T. (2007). Practical Rock Engineering

Hunt, R.E. (2007). Geologic Hazards. A Field Guide for Geotechnical Engineers. CRC Press Book

IGME (1993). Manual de Ingeniería Geológica.

IPENZ (2014). Guidelines for Professional Engineering Geologists.

Joint European Working Group of the IAEG, ISRM and ISSMGE (2004). Professional Tasks, Responsibilities and Co-operation in Ground Engineering

López Marinas, J.M. (2007). Geología aplicada a la ingeniería civil. Editoriales Dossat-2000

Mathewson, C.C. (1985). Engineering Geology. Charles E. Merril Publishing Company

McLean, A.C. and Gribble, C.D. (2005). Geology for Civil Engineers. Taylor & Francis e-Library.

NZ Geotechnical Society (2005). Field Description of Soil and Rock.

Plaza Díez, O. (2005). Geología Aplicada a la Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Madrid.

Pozo Rodríguez, M. and González Yélamos, J. (2003). Geología Práctica. Prentice Hall.

SCS (1978). Engineering Geology.

Turner, A.K. and Rengers, N. (2010). A Report Proposing the Adaptation of the ASCE Body of Knowledge Competency-based Approach to the Assessment of Education and Training Needs in Geo-Engineering.

Whaltham, T. (2009). Foundations of Engineering Geology, Third Edition. CRC Press Book.

El geólogo en el Geoturismo

Gabriel Chicote
Asesor en Geoturismo y Patrimonio Geológico del ICOG (España)
Ruth Hernández
Directora de Turismo Geológico

Una de las primeras definiciones de geoturismo, viene del ámbito geográfico, descrito por Tourtellot, en 2004, como un turismo que sostiene o enriquece el carácter geográfico de un lugar y su ambiente, patrimonio, estética, cultura y el bienestar de sus habitantes. Posteriormente han existido muchas más definiciones haciendo hincapié más en el aspecto geológico que geográfico.

La palabra geoturismo está compuesta por dos vocablos, "geo" que viene del término griego Gaia, la madre tierra y "turismo" que es definido en 2011 por la Organización Mundial del Turismo de las Naciones Unidas, como las actividades que realizan las personas (turistas) durante sus viajes y estancias en lugares distintos al de su entorno habitual, por un período consecutivo inferior a un año y mayor a un día, con fines de ocio, por negocios o por otros motivos. Como definiciones más usadas en el ámbito académico tenemos la que dio Hose en 1995, el cual lo define como la modalidad de turismo de naturaleza (ecoturismo) que emplea como recurso el patrimonio geológico y que él mismo vuelve a definir en el año 2000, como viajar con objeto de experimentar, aprender y disfrutar el patrimonio de la Tierra.

La definición de geoturismo de Hose (1995) se completa además con la definición que hace la UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza) la cual define Ecoturismo como una actividad turística ambientalmente responsable, consistente en viajar o visitar áreas naturales, con el fin de disfrutar, apreciar y observar los atractivos

naturales (paisaje, geología, flora, fauna u otros) de dichas áreas, así como cualquier manifestación cultural, del presente y del pasado, que pueda encontrarse allí, a través de un proceso que promueve la conservación, tiene bajo impacto ambiental y cultural, y propicia la participación activa de las poblaciones locales favoreciendo un modelo de desarrollo sostenible del entorno.

Fig. 1.- Ordesa en el Pirineo oscense. Una de las geologías más turísticas. Gabriel Chicote.

Por lo tanto, el geoturismo hay que relacionarlo con la geodiversidad, el patrimonio geológico y la geoconservación:

- La geodiversidad incluye todos los elementos geológicos, no sólo los que tienen valor (patrimonio geológico), sino también los que no lo tienen (el resto de elementos geológicos) y se refiere al número y variedad de éstos elementos presentes en un lugar. La geodiversidad de un territorio es reflejo de los procesos y acontecimientos geológicos que han tenido lugar a lo largo de su historia.

- El patrimonio geológico es el conjunto de elementos naturales geológicos que poseen valor científico, cultural, turístico y/o educativo, y que permiten conocer, estudiar e interpretar:

  - el origen y evolución de la Tierra
  - los procesos que la han modelado
  - los climas y paisajes del pasado y presente
  - el origen y evolución de la vida

- La geoconservación es el conjunto de técnicas de conservación del patrimonio geológico.

A todo lo anterior hay que añadir que el geoturismo debe ser sostenible y accesible.

Geoturismo sostenible

La definición de turismo sostenible por la Organización Mundial del Turismo (OMT) es:

"El turismo que tiene plenamente en cuenta las repercusiones actuales y futuras, económicas, sociales y medioambientales para satisfacer las necesidades de los visitantes, de la industria, del entorno y de las comunidades anfitrionas."

Las directrices para el desarrollo sostenible del turismo y las prácticas de gestión sostenible se aplican a todas las formas de turismo en todos los tipos de destinos, incluidos el turismo de masas y los diversos segmentos turísticos. Los principios de sostenibilidad se refieren a los aspectos medioambiental, económico y sociocultural del desarrollo turístico, habiéndose de establecer un equilibrio adecuado entre esas tres dimensiones para garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

Por lo tanto, el turismo sostenible debe:

- Dar un uso óptimo a los recursos medioambientales, que son un elemento fundamental del desarrollo turístico, manteniendo los procesos ecológicos esenciales y ayudando a conservar los recursos naturales y la diversidad biológica.

- Respetar la autenticidad sociocultural de las comunidades anfitrionas, conservar sus activos culturales y arquitectónicos y sus valores tradicionales, y contribuir al entendimiento y la tolerancia intercultural.

- Asegurar unas actividades económicas viables a largo plazo, que reporten a todos los agentes, unos beneficios socioeconómicos bien distribuidos, entre los que se cuenten oportunidades de empleo estable y de obtención de ingresos y servicios sociales para las comunidades anfitrionas, que contribuyan a la reducción de la pobreza.

- Los cuatro pilares del turismo sostenible son:

  - Planificación efectiva de la sostenibilidad.
  - Maximización de los beneficios sociales y económicos para la comunidad local.
  - Reducción de los impactos negativos al patrimonio cultural.
  - Reducción de los impactos negativos al patrimonio ambiental.

- Respecto al geoturismo, se aconseja tener en cuenta las siguientes recomendaciones comunes para el uso sostenible de todas las categorías de georrecursos:

- Incentivar la investigación y el conocimiento del patrimonio geológico y la geodiversidad.
- Elaborar materiales de divulgación e interpretación del patrimonio geológico y la geodiversidad.
- Planificar la adecuación de infraestructuras y señalización, así como el desarrollo de actividades teniendo en cuenta la presencia de ecosistemas singulares o especies presentes.
- Obtener los permisos y licencias necesarios para el desarrollo de la actividad.
- No muestrear minerales, rocas, fósiles, estructuras sedimentarias, espeleotemas, elementos arqueológicos o del patrimonio geominero.
- Respetar la normativa de comportamiento del espacio natural o lugar de interés en donde se ubiquen los georrecursos.
- Proporcionar las medidas de seguridad necesarias a los usuarios a los que estén dirigidas las actividades.

Geoturismo accesible

Según la Organización Mundial del Turismo (OMT), el turismo accesible es “aquel que pretende facilitar el acceso de las personas con discapacidad a los servicios turísticos”. Por lo tanto, posibilita que las personas con discapacidad permanente o temporal cuenten con las condiciones adecuadas de seguridad y autonomía para el desarrollo de sus actividades en ámbitos físicos, en la prestación de servicios y en los sistemas de comunicación.

El turismo accesible provoca que aquellas personas con discapacidad obtengan plena integración desde la óptica funcional y psicológica, mediante la práctica de actividades turísticas y de recreación, generando así satisfacción individual y social, en el destino que visita, creándose un hábitat integrador y de inclusión.

Un ejemplo donde poder realizar turismo geológico accesible es el Programa de las Vías Verdes. En España, más de 2.000 km de infraestructuras ferroviarias en desuso han sido convertidas en itinerarios cicloturistas y senderistas adaptados para todo tipo de público y 100% accesibles.

Como una apreciación más el término turismo geológico está también en auge, pero el termino geoturismo es el más utilizado dentro del campo académico debido a su traducción al inglés (geotourism), no se encuentran casi referencias al termino anglosajón *geological tourism*. Sobre este punto anotar que la utilización de ambos términos, geoturismo y turismo geológico pueden ser sinónimos al igual que el uso de los términos ecoturismo y turismo ecológico, pero todavía no hay definición por parte de la Organización Mundial del turismo del término turismo geológico, que no es más que un término más comercial

que adjetiva al termino turismo y lo relaciona con la geología. Igualmente sucede con el término geopatrimonio que se ve con frecuencia utilizado en países latinoamericanos en vez del término patrimonio geológico.

¿A quién va dirigido?

El público objetivo lo podemos inferir si nos acercamos y conocemos a los que son ahora mismo los buques insignia de esta modalidad de turismo: Los Geoparques.

Las actividades y la oferta cultural que presentan son muy variadas:

RUTAS O SENDEROS SEÑALIZADOS
- Georrutas
- Rutas btt

MIRADORES TEMÁTICOS
VISITAS GUIADAS POR PROFESIONALES
VISITAS AUTOGUIADAS
- Museos y centros de interpretación.

OTRAS ACTIVIDADES AL AIRE LIBRE

Van a permitir completar la oferta de ocio para el turista y a la vez permite el desarrollo y la implicación en el proyecto de empresas y/o organizaciones no relacionadas directamente con la geología.

Rutas BTT, Senderismo, Surf, Paseos a caballo, Kayak, Buceo, Vela, Talasoterapia, Paintball, Espeleología, Golf, Flyboard.

ALGUNAS “MENOS” TURÍSTICAS

En el Geoparque, y para que no pierda su necesario valor científico y divulgativo se realizan otras actividades como proyectos de investigación, conferencias y jornadas científicas o congresos especializados.

En un Geoparque se conjugan y articulan los equipamientos y actividades relacionados con los georrecursos, ofreciendo una variedad de propuestas que permitan el disfrute del mayor número posible de turistas respetando siempre los principios y objetivos alrededor de los cuales se ha desarrollado el GEOESPACIO. Ofrecen un atractivo enfoque turístico distinto y difícil de rechazar que supone una nueva forma de disfrutar y vivir experiencias con nuestras raíces, nuestro acervo y que pondrá a prueba todos nuestros sentidos.

Están integrados en el proyecto *Global Geoparks* a nivel mundial dirigido por la UNESCO, y son territorios que apuestan por una estrategia de desarrollo sostenible basado en sus valores naturales y culturales, trabajando para poner en valor el medio natural, especialmente el medio geológico, pero también la cultura propia del territorio.

Los españoles están englobados dentro de los *EuropeanGeoparks* y materializan un proyecto de turismo geológico mixto que cuenta con espectaculares "equipamientos" relacionados con la geología, tanto naturales como antrópicos, y en los que se han desarrollado una atractiva y novedosa oferta de actividades geológicas para satisfacer a casi cualquier tipo de turista. Rutas geológicas guiadas por tierra y mar, talleres experienciales y actividades de mestizaje donde combinar geología, gastronomía, pintura, escultura, artes escénicas, aventura, etc.

El territorio donde se ubican ofrece todos los servicios turísticos que el visitante puede necesitar. Siempre con el respeto hacia el medio natural como el valor que guía y ensambla todo.

En España hay doce Geoparques y en ellos vamos a poder conocer y disfrutar toda la geodiversidad que caracteriza este país. Desde los volcanes de las islas Canarias a las playas del Cabo de Gata, de las cumbres de los Pirineos a los acantilados de la Costa Vasca, de las hoces del río Gallo, en Guadalajara, a las cuarcitas de las Villuercas.

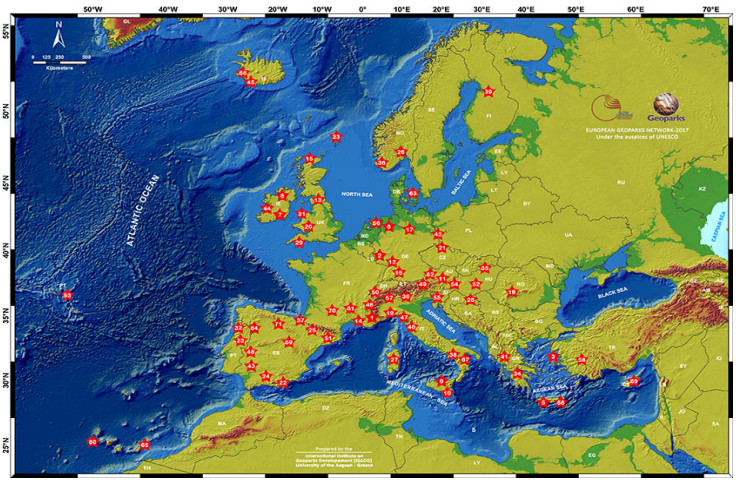

Fig. 2. Más de 70 Geoparques en el territorio europeo. www.europeangeoparks.org

Demos un paseo rápido por estos 12 destinos geoturísticos y sus características principales.

- "Geoparque" del Maestrazgo: *Montañas, crestas y cañones teñidos con el color gris de la caliza. (En el año 2017 le retiraron temporalmente, eso esperamos, la categoría de Geoparque).*

En estos momentos el parque Cultural del Maestrazgo está integrado por espacios naturales y singulares ejemplos del patrimonio cultural los cuales gozan ya de un reconocimiento legal específico, como la declaración de un elevado número de Bienes de Interés Cultural, 10 Conjuntos Históricos, así como 2 conjuntos de arte rupestre levantino, patrimonio de la Humanidad y 1 zona arqueológica de interés.

Fig. 3. Órganos de Montoro. Web del Geoparque.

En este marco, el inventario de yacimientos paleontológicos con reconocimiento oficial asciende a 70, además de contar con un total de 48 puntos de interés Geológico distribuidos por toda la geografía actual del parque Cultural del Maestrazgo.

Nos permite estudiar un registro muy completo de la historia de la tierra durante 600 Ma, siendo uno de los lugares a escala planetaria más privilegiados para el estudio y evolución de la fauna del Terciario.

- Geoparque Cabo de Gata-Níjar: *La perfecta mezcla entre una espectacular geomorfología litoral y materiales rocosos que nos relatan historias de antiguas erupciones volcánicas.*

Fig.4. Litoral del Geoparque. Web geoparques de Europa. Foto: Javier Hernández.

En el Geoparque de Cabo de Gata-Níjar se diferencian dos dominios geológicos absolutamente diferentes que coinciden, a grandes rasgos, con sus dos grandes unidades fisiográficas: la sierra volcánica del Cabo y la llanura litoral de la bahía de Almería, ambas de un valor geológico excepcional.

La presencia de un patrimonio geológico tan singular ha permitido desarrollar una extensa red de GEOSITIOS que permiten al visitante descubrir la geodiversidad de este espacio natural. Estos geositios cuentan diversos equipamientos de uso público, tales como la red de miradores del Geoparque, una extensa dotación de paneles interpretativos, seis puntos de información, la red de senderos del Parque Natural, el Centro de Visitantes de las Amoladeras y, por supuesto, el primer Centro Geoturístico de Andalucía “La Casa de los Volcanes”.

- Geoparque de Sobrarbe: *Simplemente uno de los lugares geológicos más bellos y espectaculares del mundo.*

Desde el corazón de los Pirineos, el Geoparque de Sobrarbe disfruta de un lugar privilegiado para desvelar los secretos de la formación de esta cadena alpina. En cada rincón podemos encontrar una pieza del rompecabezas de la historia de la Tierra que está escrita en las rocas. Además de la riqueza geológica, incluye un extraordinario patrimonio ecológico (reservas naturales, flora y fauna endémicas) y cultural (arte, folclore, gastronomía, etc.).

Fig. 5. El Circo de Soaso. “Cierre del Cañón de Ordesa”. Geoparque de Sobrarbe. Foto: Gabriel Chicote.

- Geoparque Sierras Subbéticas

(Contenidos obtenidos de la web oficial del Parque)

Un territorio montañoso en el corazón de la cordillera Bética, donde los antiguos fondos del mar de Tethys son modelados por el karst. Las series de rocas mesozoicas albergan abundantes restos de invertebrados marinos. Es éste el reino de los ammonites.

La influencia humana está muy presente en estas sierras. El blanco de los caseríos y el verde de las plantaciones de olivar se integran en el paisaje rocoso en un equilibrio de belleza singular.

- Geoparque Costa Vasca: La impresionante geología costera del Flysch vista desde tierra y mar. (*http://www.geoparkea.com*)

Pequeño territorio encajado entre el mar Cantábrico y las montañas vascas, conformado por los municipios de Zumaia, Deba y Mutriku. A primera vista, el Geoparque destaca por la armonía de las diferentes tonalidades de verde de los pastos y bosques que se suceden desde la línea de costa hasta tierra adentro. Pero el verdadero interés de este lugar se encuentra en sus entrañas. La Geología es la verdadera protagonista de un paisaje que guarda la historia de algunos de los episodios más impresionantes de la historia reciente de la tierra.

Fig. 6. El Flysch. Geoparkea. Web del Geoparque de la Costa Vasca.

- Geoparque Sierra Norte de Sevilla

El Geoparque Sierra Norte de Sevilla se sitúa en las alineaciones montañosas de la región central de Sierra Morena, entre las zonas geológicas de Ossa-Morena y Sudportuguesa del Orógeno Varisco Ibérico. La mayoría de las rocas son de edades correspondientes al Proterozoico (entre 1.000 y 540 Ma) y Paleozoico (entre 540 y 250 Ma), y en algún sector posiblemente de edad triásica (entre 250 y 200 Ma), excepto en la zona sur-oriental del parque, donde hay algunos afloramientos de rocas sedimentarias del Mioceno (entre 25 y 5 Ma), pertenecientes a la cuenca sedimentaria del río Guadalquivir.

Las grandes dimensiones del geoparque y su riqueza geológica, arqueológica y minera, han posibilitado el recopilar hasta ahora múltiples Puntos de Interés Geológico y varias Rutas Geoturísticas de corto a medio recorrido. Estas localidades y rutas geoturísticas comprenden los aspectos más significativos del Geoparque.

- Geoparque Villuercas-Ibores-Jara: Empuje renovado a la geología, el hombre, la tradición, la historia y la gastronomía del interior de la península Ibérica.
http://www.geoparquevilluercas.es/

El Geoparque de Villuercas-Ibores-Jara es un macizo montañoso de amplia extensión, 2.544 km^2 de superficie, situado en el sureste de la provincia de Cáceres, entre las cuencas del Tajo y del Guadiana. Su mayor altura es el “Risco de La Villuerca” (1601 m), y desde su cima se ofrece una magnífica vista que incluye las cadenas montañosas, los valles, las rañas y Guadalupe, al sur, con el Real Monasterio como seña de identidad.

Fig. 7. La villuerca, un relieve apalachense en Extremadura. Web del Geoparque.

Para interpretar la geología de este Geoparque partiremos de la observación desde "La Villuerca" de un núcleo montañoso paleozoico rodeado de antiguas penillanuras. Un sistema de sierras y valles alineados. El actual modelado de la red fluvial actuando sobre este territorio tan intensamente plegado y fracturado ha configurado el paisaje que observamos, con su geomorfología característica que es conocida como "relieve apalachense" por analogía con la geomorfología que se encuentra en los Montes Apalaches de América del Norte.

- Geoparque Cataluña Central: Cuevas, salinas y deltas fosilizados; entretejidos por y con el hombre. http://www.geoparc.cat/es/

Hace más de 36 Ma, en el corazón geográfico de Cataluña, existió un mar que desapareció con el alzamiento de los Pirineos, en un proceso que nos ha dejado espectaculares formaciones rocosas y ricos recursos naturales que han definido el paisaje y la sociedad del territorio.

Este parque geológico y minero de la Cataluña Central es un proyecto vertebrador que pone en valor los atractivos geológicos y mineros del territorio así como los activos turísticos bajo un denominador común, el geoturismo, con una oferta turística interesante y de calidad, que integra cultura, naturaleza, geología, minería y gastronomía.

Fig. 8. “Cavidades” kársticas. Web del Geoparque.

Dentro del Geoparque podremos recorrer la Cuenca Potásica Catalana, que es un ejemplo de relevancia mundial de la sedimentación de rocas evaporíticas marinas, con minerales como la halita (sal común) y silvina (potasa), formadas hace unos 37 Ma en un contexto tectónico espectacular: el levantamiento de los Pirineos.

Sin olvidar su museo de geología que va más allá de un museo clásico, ya que, además de mostrar colecciones representativas de minerales, rocas y fósiles, se enseñan las utilidades que tienen estos materiales geológicos para las personas.

- Geoparque Comarca de Molina – *Alto Tajo: La variedad geológica y paleontológica materializada en un Geoparque*. *www.geoparquemolina.com*

El territorio del Geoparque se corresponde con el Señorío de Molina–Alto Tajo, una de las cuatro comarcas naturales que conforman la provincia de Guadalajara, en la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha. Se trata, por tanto, de una comarca natural en la que pueden identificarse diversos sectores con características propias, pero con una identidad común.

Fig. 9. Barranco de la Hoz del Río Gallo. Web del Geoparque.

Su patrimonio geológico se caracteriza por su valor y su notable geodiversidad. Destaca la presencia de importantes series estratigráficas paleozoicas (Ordovícico y Silúrico) y mesozoicas (Triásico, Jurásico y Cretácico), la amplia variedad litológica, la existencia de diversos yacimientos mineralógicos y paleontológicos, diferentes ámbitos tectónicos y una gran diversidad geomorfológica que se traduce en la variedad de los paisajes presentes en el territorio. Por citar tan sólo algunos ejemplos, destacan la sección del Silúrico inferior, que constituye un referente bioestratigrafico mundial; la sección del límite Toarciense-Aaleniense de Fuentelsaz, uno de los tres *Global Boundary Stratotype Section and Point* (GSSP) ubicados en España y aprobado por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS); los árboles fósiles pérmicos de la Sierra de Aragoncillo; la localidad-tipo del aragonito; la sección Pérmico-Triásico del Barranco de la Hoz; o los pliegues de Orea y Cuevas Labradas.

Fig. 10.- Geoparque de tronos. Castillo de Zafra: *Una torre que invita a la alegría*

- Geoparque del Hierro: Geología en vivo y en directo. *http://geoparqueelhierro.es*

La epopeya geológica de El Hierro se inició hace unos 100 Ma, cuando el fondo del océano comenzó a abombarse debido al incontenible empuje del manto. Finalmente, la corteza oceánica acabó por romperse y comenzó el ascenso del manto. Por las grietas empezó a fluir el magma que, por sucesivas erupciones y apilamientos, fue levantando el edificio insular hasta que éste emergió finalmente del océano formando una imponente pirámide triangular coronada por un volcán de más de 2000 m de altura. Las grietas iniciales se convirtieron en conductos de emisión de lava que dieron paso a las tres rift dorsales sobre las que se alinean numerosos conos volcánicos.

Fig. 11. Logotipo del Geoparque.

A pesar de que ya han pasado más de 200 años desde la última erupción en tierra, El Hierro cuenta con la mayor densidad de volcanes de Canarias, con más de 500 conos a cielo abierto y otros 300 cubiertos por coladas más recientes. Por esto se le ha dado a El Hierro el sobrenombre de "La isla de los 1000 volcanes". Aunque las cuevas y tubos volcánicos de la isla todavía tienen que ser investigados exhaustivamente, ya se han podido catalogar unos 70. Algunos de ellos son muy notables por la belleza de sus estafilitos o por su extensión, como el caso de la Cueva de Don Justo, cuyo conjunto de galerías supera los 6 km de longitud, encontrándose entre los más largos del mundo. Actualmente se encuentra cerrada para proteger un endemismo de la cueva.

Pero no acaba aquí la historia de las erupciones y de las nuevas formaciones geológicas en El Hierro, puesto que, en octubre de 2011, hubo una erupción submarina en el mar de Las Calmas, a tan sólo dos millas de la costa del pueblo de La Restinga, contribuyendo a enriquecer aún más los paisajes submarinos de la isla, famosos y conocidos ya por buceadores de todo el mundo.

- Geoparque de Lanzarote y archipiélago Chinijo: *La geología al descubierto.* *http://www.geoparquelanzarote.org/*

Un verdadero museo al aire libre donde todos los rasgos geológicos constituyen un magnífico recurso didáctico para comprender los diferentes procesos que configuran el paisaje que vemos actualmente y otro turístico para poder disfrutar de toda su espectacularidad.

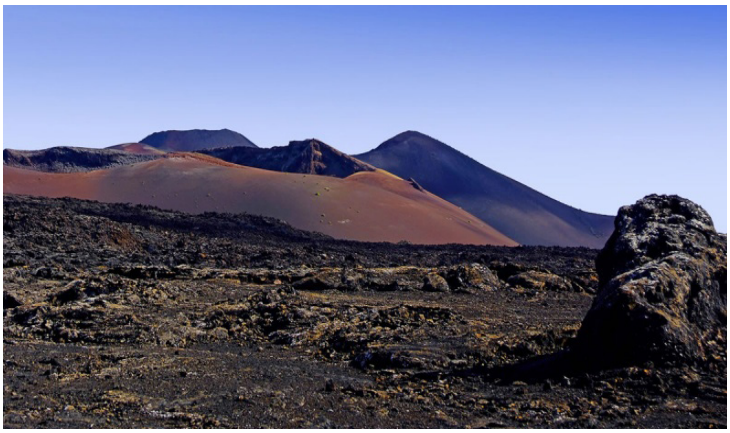

Fig. 12. Volcanes multicolores en Lanzarote. Web de Geoparque.

Así, se pueden encontrar edificios volcánicos complejos, volcanes monogenéticos, coladas de lava con todas las morfologías posibles, grandes mantos de piroclastos, vertiginosos acantilados, valles, playas, dunas, etc.

- Geoparque de Las Loras. *https://geoparquelasloras.es/*

Territorio situado al oriente de la cordillera Cantábrica que incluye poblaciones de Burgos, Palencia y Cantabria, cuyo paisaje actual nos cuenta historias increíbles que han sucedido durante los últimos 250 Ma. Fondos marinos, grandes ríos, fuerzas descomunales capaces de plegar todas estas rocas, la erosión implacable de las mismas. Todo ello, junto con la intervención humana, ha configurado un paisaje único.

Fig. 13. Cara Sur de Peña Ulaña. Foto: Karmah Salman.

Las estructuras más características del paisaje comarcal son los relieves invertidos que forman elevadas parameras o mesetas calizas, que no son sino sinclinales (zonas bajas del plegamiento) colgados, a partir de la erosión de los anticlinales adyacentes (zonas altas del plegamiento). Estas altas mesetas son aquí denominadas "Loras", que dan nombre a toda la comarca.

- Geoparque de Tremp-Montsec.

(Contenidos obtenidos de la web oficial de la Reserva)

En la zona del Proyecto Geoparque se pueden destacar los siguientes elementos distintivos:

- Patrimonio paleontológico. La existencia de restos de dinosaurios en la Conca de Tremp fue notificada por primera vez en el año 1927.
- El proyecto Geoparc Conca de Tremp-Montsec esté localizado a lo largo del perfil sísmico ECORS Pirineos.
- Destacan el estratotipo del Ilerdiano, sección patrón internacional de una parte del Paleógeno, los conglomerados sinorogénicos y formaciones deltaicas.
- El Proyecto Geoparque Conca de Tremp – Montsec sí que presta atención al patrimonio edafológico como recurso natural no renovable, que es clave en la dinámica de los ecosistemas y del paisaje por sus funciones ecológicas, soporte de actividades socioeconómicas, herencia cultural, etc.

La variada red de Geoparques que podemos disfrutar en el territorio español conforma una extensa oferta turística de calidad donde la geología se ofrece adornada con su fauna y flora asociadas y se adereza con gastronomía, tradiciones, fiestas, folclore, arte, etc.

Ciencia e investigación. Dos valores añadidos, de calidad, y propios del Geoturismo

Entrevista a *Jesús Martínez Frías*.

Fig. 14. Jesús Martínez Frías (Madrid, 1960). Doctor en Ciencias Geológicas y experto en meteoritos y geología planetaria. Investigador Científico del IGEO (Instituto de Geociencias CSIC-UCM), Miembro del Comité Científico del Geoparque de la Costa Vasca, Asesor Científico del Geoparque de Lanzarote y Presidente de la Asociación Internacional de Geoética (International Association for Geoethics – IAGETH).

Participa en el programa PANGEA (https://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/Caves/What_is_Pangaea) de la Agencia Espacial Europea (ESA) como Instructor de geología y análogos planetarios, donde forma a los astronautas de la ESA en los geoparques de Lanzarote y El Hierro en las Islas Canarias (España).

P: Por favor y para empezar, defínete como geólogo.

R: Científico investigador y profesional en el campo de la geología y especialmente en el de la geología planetaria.

P: ¿Qué es para ti el geoturismo?

R: Es una mezcla de geología, geociencias y turismo, de tal manera que el resultado de la suma es mucho más completo e interesante para el público en general que las partes agregadas.

P: ¿Y La importancia de los geoparques en el geoturismo?

R: Son piezas fundamentales tanto en el geoturismo como en la educación de las geociencias. Son el motor principal y un escaparate fiable de este modelo turístico. El elevado número de geoparques acreditados, evidencia la excelencia en Geodiversidad que atesora España.

P: ¿Cuál es el papel de la ciencia y la investigación en el geoturismo?

R: Es fundamental, puesto que si quieres aportar calidad y confianza debe haber el respaldo de una buena base científica que acredite que lo que se está mostrando a los turistas es válido y significativo. Es la que encuentra y permite transmitir el mensaje que hay detrás de cada paisaje.

P: ¿Cuál es la importancia de proyectos como PANGEA de la Agencia Espacial Europea?

R: Hacen visibles a nivel internacional a los geoparques en dónde se desarrollan, y al geoturismo, en general. Nos ponen en la vanguardia de la ciencia y la educación en geociencias, en el mundo.

P: ¿Cómo ves el futuro del geoturismo y qué puede suponer para los geólogos, especialmente para los futuros profesionales de las geociencias?

R: Muy prometedor. Puesto que además de la componente científica también presenta una muy significativa como motor de desarrollo del territorio. Esto permitirá que numerosos profesionales, competentes en geociencias, puedan desarrollar su labor profesional en este campo aportando conocimientos y esfuerzo. Uno de los retos que nos competen a los geólogos que ya trabajamos en ello, es conseguir que se incorpore, este nuevo campo, al programa académico y formativo de universidades e instituciones relacionadas con la educación.

P: ¿Qué papel juega en la percepción que tiene de la geología y los geólogos la sociedad actual?

R: Nos acerca y permite traducir un lenguaje, a veces demasiado críptico, al ciudadano de a pie. Permite que el geólogo se ponga en valor como profesional más asequible y como pieza clave en el desarrollo de zonas menos favorecidas del territorio. La Sociedad Geológica de España, con proyectos tan exitosos como el del Geolodía, ya lleva varios años trabajando en este campo y con ese objetivo de hacer visible la importante labor del geólogo en la vida cotidiana de la sociedad.

"El elevado número de geoparques acreditados evidencia la excelencia en geodiversidad que atesora España"

"La ciencia y la investigación son las que encuentran y posibilitan el transmitir el mensaje que hay detrás de cada paisaje"

"Uno de los retos que nos competen a los geólogos que ya trabajamos en ello, es conseguir que se incorpore, este nuevo campo, al programa académico y formativo de universidades e instituciones relacionadas con la educación en Europa"

El papel del geólogo en el Geoturismo

Lo que se pretende conseguir al desarrollar el campo de la geología turística es:

- Crear un motor cultural-social-económico "autofinanciado" que permita el desarrollo de zonas menos favorecidas.
- Aumentar el conocimiento geológico del público en general.
- Fomentar la sensibilidad hacia el medio geológico.
- Posibilitar la conservación del patrimonio geológico.
- Poner en valor el patrimonio geológico existente.
- Posibilitar el desarrollo de nuevas líneas de investigación, estudio o trabajo con la geología.

Y como "subproducto" aumentar la expectativa laboral del geólogo.

Las funciones básicas que puede desarrollar un geólogo en el geoturismo son:

- Identificar el georrecurso a explotar.
- Identificar y analizar sus potencialidades turísticas.
- Identificar y analizar las potencialidades turísticas del entorno.
- Participar en el diseño del programa de explotación turística.
- Diseñar las actividades del programa.
- Ejecutar las actividades.
- Coordinar a los distintos profesionales que se interrelacionan en el programa.
- Evaluar durante y a posteriori el desarrollo de las actividades y el programa.
- Proponer mejoras y aplicarlas.

Como podemos inferir de lo anterior, un geólogo en el campo del Geoturismo puede efectuar tanto tareas de técnico, como otras más relacionadas con la interpretación

del patrimonio y el guiado de grupos. Las primeras las realizará en el momento de hacer los inventarios de LIGs (Lugares de Interés Geológico), y las segundas en el diseño y durante el desarrollo del programa geoturístico, supervisando y asesorando para asegurar una óptima geoconservación.

Los conocimientos y habilidades que debe tener el geólogo especializado en geoturismo deben ser variados y extensos, con una base sólida sobre el patrimonio geológico y la geoconservación, conociendo además la geodiversidad de la zona en la que vaya a desarrollar su actividad. A estos conocimientos fundamentales hay que añadir la capacidad de poder explicar de manera clara y concisa términos geológicos básicos para la interpretación del paisaje y el entorno natural, por lo tanto, la labor didáctica del profesional de la geología debe ser un pilar más en su formación ganando importancia aquí el dominio sobre la Interpretación del Patrimonio Natural/Cultural.

Es imprescindible que además de estos conocimientos básicos sus actividades tengan en cuenta los recursos de la zona, empresas, alojamientos y guías locales, formando parte de las estrategias de desarrollo de las comarcas.

Una labor principal, recae en las enseñanzas que debe transmitir, en la educación en valores de los participantes, ya se conoce el dicho de que “para respetar algo, antes hay que conocerlo y valorarlo”. Dar valor al patrimonio geológico implica educar a la ciudadanía en el respeto al mismo y en evitar su expolio.

Fig. 15. Es quién guía al profano por la maravillosa ruta de la geología. El Entremón en Huesca. Foto: Gabriel Chicote.

El patrimonio geológico debe "presentarse" íntimamente ligado con el entorno natural y el patrimonio histórico y cultural de la zona donde se desarrollan las actividades, es decir, hay que enlazarlo con otros temas de interés para ayudar a los participantes a entender el pasado, presente y futuro de la zona visitada. Por lo tanto, añadir la capacidad de diseñar y preparar material apropiado para las actividades es otro punto a desarrollar por el profesional.

El conocimiento de la legislación tanto a nivel Nacional, de Comunidad Autónoma y de provincia sería el último pilar a añadir a la formación básica del profesional del geoturismo.

Fig 16.- Formación básica del profesional del geoturismo

El papel a desempeñar por parte de los profesionales de la geología enfocados a desarrollar su trabajo dentro del campo del geoturismo se puede resumir de la siguiente manera:

- Artístico: realización de maquetas y moldes de fósiles para evitar el expolio de los mismos.

- Divulgación y didáctica: realización de documentación, diagramas y contenido que pueda ser utilizado en material impreso y/o en paneles explicativos, participación en congresos o ciclos de conferencias no necesariamente dentro del ámbito científico de la geología donde se relacione el entorno natural con el patrimonio histórico y cultural, diseño y realización de itinerarios geológicos guiados o autoguiados.

- Investigación: Inventariado de lugares de interés geológico, estudio de su vulnerabilidad y catalogación. Conservación y protección de los yacimientos.

- Docente: En cursos sobre geodiversidad, patrimonio geológico, geoconservación, legislación, geoturismo, sostenibilidad, accesibilidad y guía de la naturaleza especialista en geología.

Fig. 17. El río Tinto. Geoturismo marciano en Huelva. Foto: Gabriel Chicote.

Como se puede apreciar, el papel del geólogo en el geoturismo es amplio y fundamental para el óptimo desarrollo del mismo. Un geólogo suficientemente formado en interpretación del patrimonio y turismo aportará a este campo la base científica necesaria siempre dentro del intervalo lúdico y atrayente que debe predominar en esta emergente variedad del turismo sostenible y responsable.

Referencias bibliográficas

Texto íntegro de La Declaración Internacional sobre los Derechos de la Memoria de la Tierra: Actes du Premier Symposium International sur la Protection du Patrimoine (Digne, France, 1991). Memoires de la Societé de Geologique de France. Nouvelle Serie nº 1165, 276 pp. París.

Carcavilla, L., Belmonte, A., Durán J.J. e Hilario, A. (2011). Geoturismo: concepto y perspectivas en España. Revista Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, (19.1), 81-94.

Carcavilla, L. y Palacio, J. (2010). Geosites: aportación española al patrimonio geológico mundial. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. 231 pp.

Carcavilla, L. (2012). Geoconservación. Ed. La Catarata e Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. 126 pp.

Carcavilla, L., Durán, J.J. y López-Martínez, J. (2008). Geodiversidad: concepto y relación con el patrimonio geológico. Geo-Temas, 10, 1299-1303. VII Congreso Geológico de España. Las Palmas de Gran Canaria.

Carcavilla, L., Durán, J.J. y López-Martínez, J. (2007). Patrimonio Geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos. Cuadernos del Museo Geominero, nº7. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.

Chicote, G. (2018). Geoturismo-Interpretación-Etnogeología: Nuevos campos por explorar, nuevas oportunidades laborales. Revista Tierra y Tecnología nº 51.

Hernández, R. y de Miguel, C.J. (2015). Turismo Geológico. Revista Tierra y Tecnología nº45, 47-50.

Hernández, R. y Castillo, S. (2015). Turismo Geológico Accesible. Patrimonio geológico y geoparques, avances de un camino para todos. Cuadernos del Museo Geominero, nº18. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. 317-321.

Hilario, H., Mendia, M., Monge-Ganuzas, M., Fernández, E., Vegas, J. y Belmonte, A. (2015). Patrimonio geológico y geoparques, avances de un camino para todos. Instituto Geológico y Minero de España, 548 pp.

Hose, T.A. (2000). “Geoturismo” Europeo. Interpretación geológica y promoción de la conservación geológica para turistas. Patrimonio Geológico: Conservación y Gestión. D. Barettino, W.A.P Wimbledon y E. Gallegos (eds). Madrid. 137-159 pp.

Vegas, J., Salazar, A., Díaz-Martínez, E. y Marchán, C. (2013). Patrimonio Geológico, un recurso para el desarrollo. Cuadernos del Museo Geominero, nº15. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.

El geólogo Gemólogo

Cristina Sapalski
Vicepresidenta segunda del Ilustre Colegio Oficial
de Geólogos (ICOG). Gemóloga

Los primeros estudios y conocimientos sobre los minerales y las piedras preciosas, pertenecían a lo que conocemos como ciencias ocultas. Antiguamente, estas ciencias se basaban esencialmente en la astrología y la alquimia.

En el siglo I d.C. Plinio el Viejo redactó la enciclopedia más antigua de la historia, que contenía todos los saberes de su tiempo abarcando la física, la astronomía, geografía, botánica, zoología y medicina. Este sabio romano, nacido en el año 23 de nuestra era y muerto mientras estudiaba la erupción del Vesubio en el año 79, dedicó un volumen de su Historia Natural a las piedras preciosas.

Desde la aparición de la escritura quedaron reflejadas en distintas obras muchas de las ideas de las distintas civilizaciones sobre el mundo mineral, sobre las propiedades de los minerales, sobre los metales que se obtenían de ellos, y especialmente sobre las propiedades, mágicas o medicinales, de las que eran consideradas en cada momento como piedras preciosas.

Muchos de estos conocimientos empezaron a conocerse públicamente gracias a personajes como Alfonso X, rey de Castilla —conocido como "El Sabio"—, que vivió en la segunda mitad del siglo XIII. Su principal mérito fue buscar y hallar los tratados escritos en árabe y otros idiomas, inasequibles para quienes únicamente conocían el castellano, y traducirlos. Cuando Alfonso era todavía infante, en 1243, mandó traducir del árabe un

un tratado sobre las propiedades de las piedras, *Lapidario de Alfonso X*, que se atribuye en el prólogo de la versióncastellana a Abolays, sabio musulmán de origen caldeo, del que nada se conoce, aunque se ha intentado identificar con Abul Abbas, naturalista de al-Andalus, muerto en 1237.

Otra obra interesante, ya más tardía, es el *Libro de propiedades rerum,* la traducción hecha por Fray Vicente de Burgos de la obra homónima de Bartholomaeus Anglicus (Bartolomé Glanvilla), escrita originalmente alrededor de 1240, y muy popular a lo largo de toda la Edad Media; trata en su libro XVI íntegramente "De las piedras y los metales".

Con la llegada del Renacimiento y la difusión de la imprenta, las obras escritas dejan de ser patrimonio exclusivo de monasterios y bibliotecas. Los Probier- büchlein, pequeños manuales anónimos con procedimientos para la fundición de minerales y metales y para el ensayo de metales preciosos, aparecen en Alemania ya a comienzos del siglo XVI.

Fig. 1. Corona de lámina repujada con engastes. Tesoro de Guarrazar. Museo Arqueológico Nacional, Madrid.

Es una recopilación de propiedades físicas y virtudes de los minerales más conocidos en su tiempo.

Sin embargo, todos estos datos se apoyaban en resultados de tipo empírico. Es casi seguro que muchas referencias encontradas en escritos antiguos se refieran a piedras parecidas, es decir, lo que hoy conocemos como imitaciones. Un ejemplo de ello es el primer escrito que menciona al diamante en el libro del Éxodo, al citar al pectoral del gran sacerdote Aaron. La tercera piedra de la segunda fila del pectoral, según figura en el escrito, era un diamante "Yiahalón" y estaba grabado y para ello hubo que esperar hasta el siglo XII.

También se decía que para conocer las piedras preciosas debían echarse en la lumbre y si se quemaban y no se derretían eran naturales, pero si en el fuego se derretían y perdían la forma era señal cierta de ser artificiales. Este método, aunque desechado como técnica

analítica por razones obvias, no dejaba de tener cierto sentido puesto que las únicas gemas artificiales que se conocían eran vidrios. Hay que tener en cuenta que los primeros vidrios artificiales se asocian con la cultura del antiguo Egipto. El cristal fue inventado en Venecia en la Edad Media.

Con el invento del microscopio se consiguieron ciertos avances en la época del Renacimiento. En el siglo XVIII se comienzan a asentar las bases de la química moderna.

Pero cuando la gemología se empezó a tratar como una rama especializada de la mineralogía fue en el siglo XIX, con el descubrimiento del alumbrado eléctrico, el análisis espectral, la clasificación periódica de los elementos, los rayos X y la radiactividad natural.

En el año 1891, Verneuil dio a conocer en la Academia de Ciencias de París un informe sellado sobre un nuevo y revolucionario proceso para la síntesis del rubí, proceso que reconoció públicamente en noviembre de 1902. En el informe, Verneuil citaba la construcción de un soplete invertido de oxígeno-hidrógeno —su famoso chalumeau— que básicamente se emplea aún hoy en día en la fabricación de muchos tipos de piedras sintéticas. Esto marcó el comienzo de la verdadera carrera para la obtención cada vez más perfecta de las piedras sintéticas.

Para qué sirve la gemología

La gemología es la ciencia que estudia las piedras preciosas. Su conocimiento proporciona información sobre aspectos técnicos y comerciales, permite conocer todas las gemas y minerales gemológicos que se utilizan en el comercio, capacita para identificarlas y distinguirlas de las obtenidas por síntesis, es decir, separar las de origen natural de las artificiales (imitaciones y sintéticas). Permite descubrir los diversos tratamientos que se realizan para mejorar su aspecto o color, la importancia de estas técnicas y su repercusión comercial.

El estudio de la gemología es indispensable para los joyeros y comerciantes de gemas, ya que adquieren una serie de conocimientos que les capacitan para conocer la naturaleza de los materiales que manejan; también para el lapidario, que estudia determinadas propiedades que le sirven para realizar su trabajo con mayor seguridad y facilidad, y para el público en general que conocerá, en cada caso, la naturaleza de las gemas que pueda adquirir.

La gemología es una ciencia independiente pero a la vez relacionada con la mineralogía ya que se estudian diferentes propiedades, composición, estructura, inclusiones, tratamientos, síntesis y yacimientos minerales.

En la actualidad, el mundo de las gemas se ha complicado extraordinariamente; el comercio mundial en estos momentos sufre la competencia, muchas veces fraudulenta, de numerosas síntesis y tratamientos que en muchas ocasiones se emplean engañosamente en su comercialización.

La segunda mitad del siglo XX se ha caracterizado por una carrera vertiginosa de avances tecnológicos, relacionados con los procesos de síntesis, la manipulación de las estructuras cristalinas y sus defectos, mejoras en la transparencia de las piedras preciosas, y en la creación o modificación del color. Esto ha propiciado que cada vez sea más difícil encontrar en el mercado ejemplares que no hayan sufrido, al menos, algún tipo de tratamiento.

Las grandes dificultades que muchas veces se presentan para identificar algunos tipos de síntesis y tratamientos ha obligado en el siglo XXI a los laboratorios gemológicos tradicionales a asociarse a diversos centros de investigación para poder utilizar todo tipo de tecnología avanzada para analizar e identificar las manipulaciones que se realizan en los materiales.

Trabajo que realiza

Muchos son los problemas que existen en la actualidad para la correcta identificación de las gemas. La caracterización de gemas naturales o sintéticas es parte del trabajo diario que realiza el gemólogo.

La técnica ha evolucionado de tal manera que la tarea de los gemólogos se complica cada vez más. Con la aparición de los reactores nucleares, los aceleradores de partículas y las unidades de irradiación gamma, comenzó la carrera para obtener cambios y mejoras de color del diamante y otras piedras preciosas.

Las gemas que presentan un color no deseable pueden mejorar su apariencia gracias a un gran número de tratamientos. Los más conocidos son los tratamientos térmicos que pueden realizarse con o sin aditivos. Los más frecuentes son los realizados en amatistas, berilos, calcedonias, corindones, topacio, zircón, etc.

El segundo tipo de tratamiento es el que se realiza por irradiación, la mayoría de los tratamientos que se obtienen por éste método son estables. Hoy en día, la irradiación se aplica sobre todo en diamantes (verde y verde azul) y topacios (azul), utilizando neutrones por ser la radiación más rentable en el proceso de creación de centros de color.

El tercer tipo de tratamiento es el de las impregnaciones, tinciones, modificaciones superficiales, vidriado, relleno de fisuras, etc.

Fig. 2. Topacio irradiado Gema.

Algunos tratamientos son tan habituales que no se consideran fraudulentos, por ejemplo, los térmicos en ciertos corindones, aguamarinas y zircones incoloros; las tinciones en las ágatas y calcedonias, etc. Pero el resto, sobre todo las irradiaciones, tratamientos térmicos por difusión etc., deben indicarse en la comercialización de las piedras preciosas.

Hasta el año 1972 se consideraba que ningún diamante podía haber sido irradiado con neutrones sin la intervención del ser humano, ya que no se admitía la presencia natural de neutrones libres en la naturaleza, al menos en cantidades suficientes para producir estos efectos. Pero ese año se dio a conocer un fenómeno realmente curioso en la compañía de minas Feanceville, en Gabón; se encontró un contenido demasiado bajo de uranio-235 en su producto. Rastreando el fenómeno se descubrió que ese mineral provenía precisamente de la cantera de Oklo. Este yacimiento de uranio abarca una superficie de aproximadamente 35.000 km2. El impacto de este descubrimiento fue tan grande que se tomó la decisión de interrumpir la explotación del mineral para permitir estudios científicos del fenómeno.

Ahora se sabe que en esta región de Gabón estuvieron funcionando, hace aproximadamente 2.000 Ma, reactores nucleares naturales emitiendo flujos neutrónicos similares a los de los reactores artificiales más potentes.

Es muy difícil diferenciar si un diamante o un topacio han sido irradiados por neutrones en un laboratorio o por causas naturales. Pero hay una técnica, la espectrometría gamma de alta resolución, que en muchos de estos casos resuelve el dilema.

Otro de los grandes problemas es el tratamiento de alta presión (60 kilobares) y alta

temperatura (2.000 ºC) para modificar el color de los diamantes. Desde 1999 comenzaron a circular por el mercado abundantes diamantes incoloros de máxima calidad (D) y diamantes de color fantasía.

Uno de los procesos de tratamiento considerado de los más graves es el conocido como "difusión térmica" utilizado en corindones. Mediante este procedimiento se consigue introducir distintos elementos (Fe, Ti, Cr) en la estructura cristalina de zafiros y rubíes, elementos que hasta ahora eran los típicos causantes del color natural. El poder de penetración de estos elementos es muy limitado quedando confinados en una zona superficial relativamente delgada. Estos tratamientos son fácilmente identificables utilizando técnicas convencionales.

El mayor problema son los corindones tratados con berilio. En diciembre de 2001 se tuvo la primera noticia de un nuevo método de difusión realizado en Tailandia.

Posteriormente se demostró que esta nueva técnica consiste en la implantación de berilio en la estructura cristalina del corindón, utilizando temperaturas muy altas. De este modo se consigue que simples trazas (menos de 10 partes por millón) de un elemento tan ligero sean suficientes para que zafiros incoloros o casi incoloros adquieran colores amarillo o naranja intensos estables y además de modo integral, por lo que no sirven las técnicas convencionales que se han estado utilizando para detectar los procesos tradicionales de difusión.

Los primeros años del siglo XXI han sorprendido a los laboratorios gemológicos con una nueva síntesis de diamante, los diamantes sintéticos CVD.

En la actualidad los diamantes sintéticos de calidad gema, tanto de la serie incolora cómo de colores fantasía, se obtienen mediante dos métodos:

- HPHT (*high pressure and high temperature*) – método de alta presión y alta temperatura.
- CVD (*chemical vapor deposition*) – método de deposición de vapor químico.

En los últimos años se ha avanzado mucho en la tecnología CVD que no requeire de altas presiones. Este método, implica reacciones químicas en fase gaseosa que depositan capas de diamante sintético sobre un sustrato de diamante. Desde 2004 el método se ha ido perfeccionando cada vez más, hasta el punto de que actualmente se consiguen fácilmente diamantes gema de máxima calidad y de tamaños extraordinariamente grandes.

Lo mismo sucede con la producción de diamantes HPHT alcanzandosé tamaños

superiores a los 10ct y las melee incoloros producidos masivamente en China. Durante los primeros años de producción el color que prevalecía era el amarillo, amarillo-naranja, en la actualidad los incoloros y azules.

Los diamantes presentan las típicas características de los diamantes sintéticos HPHT: inclusiones metálicas, magnetismo, fluorescencia amarillenta débil a la luz UV corta e inertes a la UV larga, además de marcada fosforescencia en algunos. El método concluyente para su identificación es la utilización del *DiamondView,* donde se observa la típica fluorescencia y fuerte fosforescencia, que caracteriza a este material.

En general, los diamantes sintéticos CVD son más difíciles de identificar con métodos gemológicos básicos que los HPHT, debido a que no presentan inclusiones metálicas ni marcada fosforescencia en muchos casos. Son menos numerosos en el mercado en la actualidad, comparados con la síntesis HPHT. Afortunadamente, también pertenecen al tipo IIa, muy raro en la naturaleza, así que los métodos que permiten identificar el diamante como IIa, por ejemplo, la transparencia a la luz UVC, convierte el diamante incoloro en sospechoso de ser sintético CVD, requiriendo análisis especial de la piedra con técnicas analíticas avanzadas.

Herramientas que utiliza

El perfeccionamiento de las técnicas de microscopía óptica, con la aparición de la lupa binocular y mejores sistemas de iluminación permitió que los estudios de inclusiones proporcionaran datos muy importantes mediante imágenes a veces extraordinariamente bellas. Las inclusiones fluidas y las sólidas servían en muchos casos para diferenciar gemas naturales de las sintéticas e imitaciones, todo ello sin necesidad de realizar preparaciones destructivas de las gemas que, sin embargo, son indispensables para los estudios petrográficos.

Todo esto acompañado del empleo de la metodología convencional que se utiliza aún hoy en día para el análisis de los materiales gemológicos, es decir, medidas cuantificadas de ciertas propiedades físicas como son el índice de refracción, la birrefringencia y el peso específico, junto con la posibilidad de observar fenómenos como el comportamiento ante la luz ultravioleta y los rayos X y los espectros de absorción de la luz visible.

La primera mitad del siglo XX nos proporcionó nuevos descubrimientos: la teoría cuántica, la estructura planetaria del átomo, el núcleo atómico, el electrón, la mecánica cuántica, la óptica electrónica y el microscopio electrónico. La utilización de éste último instrumento junto con la espectroscopía de rayos X demostró ser una herramienta muy útil para la solución de muchos problemas gemológicos.

Desde la antigüedad, el hombre ha buscado la forma de poder aumentar su poder de resolución y de hacer visible lo invisible. La observación de objetos pequeños siempre ha estado entre los mayores desafíos que el hombre ha querido alcanzar y, sin lugar a dudas, el microscopio electrónico de barrido ha figurado entre las principales herramientas que le ha permitido salir victorioso de este reto. Pero el desarrollo de este formidable instrumento no fue un camino fácil.

El primer trabajo reconocido que describía la construcción de un aparato de microscopía electrónica de barrido se debe a Manfred von Ardenne, quien en el año 1938, construyó el primer microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) y comercialmente distribuido hasta 1965 por la compañía británica, Cambridge Instruments. El desarrollo de la microscopía electrónica permitió, entre otras cosas, alcanzar el nivel de resolución espacial que muchos investigadores de diversas disciplinas demandaban y fundar una rama de investigación que, a pesar de ser relativamente joven, ha avanzado de una manera vertiginosa en la ciencia contemporánea. Esta técnica se ha convertido en una fuente inagotable de información y desarrollo, no sólo por la resolución alcanzada, sino también por las capacidades de análisis de las técnicas asociadas a un microscopio. Este des- cubrimiento es uno de los más relevantes en el campo de aplicación de la gemología. Hace varios años se consideraba al ópalo como sílice amorfa con un contenido de agua del 2 al 20%. Por modernas técnicas de rayos X y microscopia electrónica, se ha comprobado que está formado por diminutas lepisferas compuestas por capas sucesivas de cristobalita y tridimita, de igual tamaño, dispuestas en forma de estructuras empaque- tadas. El juego de colores que a veces presenta el ópalo noble, se consideraba que se debía a la presencia de elementos cromóforos. Paradójicamente, aún se puede leer esto en alguna de las famosas enciclopedias de nuestro tiempo que se consideran actualizadas.

Las imágenes electrónicas demostraron que se trata de un fenómeno de difracción de la luz visible, que se produce al actuar los paquetes de lepisferas como rejillas de difracción y que, según su orientación, el ángulo de incidencia de la luz y el tamaño de las esferas hacen que aparezcan placas que cambian de color: violeta a rojo, violeta a verde o azul.

La ausencia de juego de colores, como sucede en el ópalo común, se debe a una precipitación simultánea de esferas de distinto tamaño.

La idea del microanalizador electrónico, en el que un haz electrónico focalizado permite excitar una superficie tan pequeña como una micra cuadrada, fue patentada en los años cuarenta del siglo XX. A partir de aquí, la aplicación del microscopio electrónico de barrido más el sistema de energía dispersiva de rayos X, es decir, un sistema de imagen complementado con un análisis químico puntual absolutamente no destructivo, ha sido una arma insustituible para diferenciar gemas naturales de materiales sintéticos y

gemas tratadas de las no tratadas, mediante el estudio de las inclusiones someras y de los rellenos provocados frecuentemente en las fisuras de los rubíes y los diamantes para mejorar su transparencia.

Pero hay que tener en cuenta que la alta tecnología favorece también los grandes avances en lo relativo a procesos de manipulación del color y a la transparencia de las gemas así como a la obtención de nuevas síntesis. Desgraciadamente estos avances van siempre por delante de los de identificación y, cuando se descubren, ya han sido normalmente introducidos en el mercado. Comienza aquí lo que los gemólogos llamamos la carrera de identificación de las nuevas técnicas que se han empleado en el nuevo tratamiento de mejora o cambio de color o en la nueva síntesis. Los inocentes tratamientos de siglos anteriores basados en el recubrimiento, el lacado y la tinción, de muy sencilla identificación, ya son historia.

Tenemos que tener en cuenta que no es incorrecto que los laboratorios investiguen y descubran nuevas síntesis o tratamientos siempre y cuando se realice un estudio exhaustivo que determine la forma idónea de identificación antes de que estos productos entren en el mercado.

Técnicas actuales

El tratamiento de difusion por el cual se submerge a la gema en un medio que contiene altas concentraciones de elementos cromóforos u otros metales que puedan afectar a su color, y se somete al calentamiento hasta temperaturas muy elevadas (hasta 1800 °C) para que estos elementos difundan en la estructura cristalina de la gema, la proporciona un color atractivo. El color producido por este tratamiento puede estar concentrado en la capa superficial (fáciles de detectar por ejemplo en zafiros) o más profundo (rubíes y zafiros tratados por difusión de berilio son extremadamente difíciles de detectar). En el caso que se consigue una difusión total del color en el interior de la piedra, resultan totalmente inútiles cualesquiera de las técnicas convencionales. A esto hay que sumar que el berilio es un elemento muy ligero, además de presentarse en muy pequeñas cantidades en gemas donde no se pueden emplear técnicas destructivas. Actualmente hay tres técnicas que resuelven el problema: el SIMS, el LA-ICP- MASAS y el LIBS. Las dos primeras se basan en la espectrometría de masas y la tercera en la espectrometría de emisión en el visible, mucho más económica. Las tres utilizan como fuente de excitación un láser de alta potencia, que produce un daño en la superficie de la gema de tamaño microscópico que hay que asumir.

Para los diamantes sintéticos CVD y HPHT, la utilización del DiamondView, que dispone de una fuente de excitación de radiación UV de 225 nm que genera imágenes de los

modelos de crecimiento de los distintos diamantes y de distribución zonal de ciertos defectos estructurales, es determinante.

El problema surge en los diamantes sintéticos HPHT (altas presiones y altas temperaturas) de pequeño tamaño, lo que se conoce como mele, diamantes de peso entre 0,08 y 0,13 ct. En estos casos, es necesario emplear técnicas de microscopía infrarroja en combinación con imágenes de catodoluminiscencia. Estas técnicas permiten separar diamantes naturales de sintéticos basadas en las características observadas en los espectros de absorción en el infrarrojo medio y las estructuras de crecimiento.

Análisis de fotoluminiscencia, topografía de rayos X o catodoluminiscencia se realizan para ayudar en la determinación de tratamientos HPHT (alta presión y alta temperatura) en diamantes para mejorar el color.

Con qué profesionales se relaciona

Los recientes avances anteriormente mencionados hacen que los gemólogos en la actualidad se relacionen con un gran número de profesionales: geólogos, físicos, químicos, lapidarios, historiadores del arte, cuerpos de seguridad del Estado, etc.

Fig. 3. Clasificación de diamantes. Lupa 10X

El grupo de Beers, que en los años treinta creó el slogan “Un diamante es para siempre”, tiene en plantilla una gran cantidad de geólogos. Los recursos técnicos y su experiencia geológica se dirigían hacia el descubrimiento de nuevos yacimientos. En la actualidad su política está cambiando, se ha creado un conflicto entre pasado y futuro. La compañia que dominaba el comercio del diamante mundial, ha pasado a un segundo lugar con el descubrimiento de yacimientos comercializados por el propio país cómo es el caso de Canadá u Australia. El contrato que tenía con Botswana, expira en el 2020, y es possible que no controle la producción es ese país. Por otro lado, Sudáfrica es políticamente inestable.

Con este panorama la compañia está pensando en crear un mercado de joyería con diamantes sintéticos, y dejar de ser una compañia minera.

El desarrollo de nuevas técnicas de análisis no destructivas ha supuesto un progreso, no sólo para la identificación de los materiales y sus tratamientos, sino también para la investigación de otras características de las gemas, antes imposibles de verificar. Con ello se han abierto campos de estudio en relación con las gemas incluidas en piezas con un interés histórico o artístico, de índole no comercial pero de gran relevancia en relación con el patrimonio cultural.

Fig. 4.Mesa Florentina. Museo del Prado.

En España se han podido realizar, entre otros, el estudio de los materiales gemológicos del Tesoro de Guarrazar, las mesas de piedras duras del museo del Prado, y numerosas piezas de joyería presentes en museos, como el Arqueológico Nacional, Lázaro Galdiano, Artes Decorativas y Museo del Prado.

Los gemólogos intervienen también en conservación del patrimonio o en procesos lega les. En estos últimos trabaja con las fuerzas de seguridad del Estado para la identificación de piezas robadas. Si previo a su robo las piezas han sido certificadas en un laboratorio gemológico serio, esto ayudará a identificarlas en caso de aparición posterior. Hay que tener en cuenta que un certificado de análisis es el carné de identidad de una gema.

La lapidación, nombre que se emplea para el tallado y pulido de las piedras preciosas, es una operación que se realiza para resaltar al máximo las propiedades de color, brillo, lustre, transparencia, dispersión, resplandores, etc.

Se necesita un estudio previo, sobre todo en el caso del diamante, de propiedades como la exfoliación y estudios ópticos, para obtener el máximo de rendimiento. Una mala exfoliación puede destrozar un cristal muy valioso. En muchos casos se utilizan técnicas mecanizadas y láser, pero los grandes diamantes se siguen estudiando y tallándose de

manera artesanal.

Por supuesto, su principal objetivo es relacionarse con el comercio de piedras preciosas, ya que gracias a los laboratorios gemológicos de prestigio se resuelven la mayoría de los problemas que afectan actualmente a la manipulación y repercusión comercial.

La gemología es una ciencia activa que se expande en todas las direcciones. Las ciencias tradicionales —mineralogía, geología y gemología se han extendido dando paso a la química, física, matemáticas, etc.—, para poder resolver muchos de los problemas actuales con que se encuentran los gemólogos del siglo XXI.

Quiénes son sus principales clientes

El comercio de joyería es, sin duda, el destino más importante al que van encaminados los estudios de gemología. En la actualidad nadie pone en duda que quienes se quieran dedicar al comercio de la joyería tienen que estudiar gemología. Pero no debe confundirse gemología con joyería; en ocasiones se estudia aquélla creyendo que al terminar se es joyero. Pero después de todo lo explicado anteriormente, se tendrá claro que la gemología sólo estudia la parte técnica relacionada con las gemas, ayudando a su conocimiento e identificación, y proporcionando —y esto es muy importante— una amplia cultura sobre todo lo relacionado con el mundo y el comercio de las gemas.

La fabricación, cada vez más abundante y diversificada de materiales con características de identificación difíciles de resolver, colocan al profesional ante situaciones de responsabilidad comercial y legal totalmente nuevas. En casos de ventas fraudulentas es imprescindible la actuación de un perito gemólogo, que intervenga ante el juez, quien por regla general tendrá claro y declarará culpable al profesional de la joyería.

Los laboratorios gemológicos de reconocido prestigio son imprescindibles en relación directa con la importancia económica de la transacción, y ayudan a desarrollar una correcta actividad profesional. El profesional de la joyería de este modo está obligado a garantizar lo que vende.

Este libro se terminó de imprimir en 2019

Ilustre Colegio
Oficial de Geólogos
C/Raquel Meller, 7
28027 Madrid
icog@icog.es
www.icog.es