

# Criterios actualizados para la enseñanza de la geología geotécnica en cursos de postgrado

## Updated criteria for geotechnical geology teaching in postgraduate courses

José Luis Salinas Rodríguez<sup>1\*</sup>

### Palabras clave

geología;  
geotecnia;  
enseñanza;  
postgrado;

### Resumen

Un mundo globalizado y con acceso inmediato a la información requiere geotécnicos rigurosos y a la vez flexibles, capaces de integrarse en proyectos de muy diversa índole y ubicación. A este horizonte entendemos que deben mirar los cursos de postgrado de ingeniería geotécnica, cuyo objetivo sustancial es tender un puente entre la teoría académica y la praxis de la realidad geotécnica. En este contexto, la geología es una disciplina que acompaña los primeros pasos de un proyecto geotécnico, involucrándose en los reconocimientos de campo y en la toma de datos del terreno. En el presente artículo se propone un programa de materias y actividades con el objetivo de contribuir a que los nuevos profesionales, además de incrementar su bagaje técnico, desarrollen un buen criterio geotécnico, una cualidad que les permitirá aplicar correctamente los conocimientos adquiridos.

### Keywords

geology;  
geotechnical;  
teaching;  
postgraduate master;

### Abstract

*A globalized world with immediate access to information requires rigorous but flexible geotechnicians, who are able to adapt to a wide range of projects. This is the horizon postgraduate courses should aim for, being their fundamental objective to bridge the gap between theory and geotechnical reality. In this respect, geology is a key discipline regarding the first steps of any given geotechnical project, for it is concerned with field recognition and data collection. In this paper we propose a program that aims to contribute, not only to increasing the knowledge of these new professionals, but also to allowing them to develop sound geotechnical criteria, a skill that will enable them to apply properly the expertise acquired.*

El trabajo geotécnico de campo  
requiere sintetizar lo que vemos,  
y ante todo interpretar lo que vemos.  
No basta con mirar, hay que saber ver.

José Luis Salinas Rodríguez

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde la última década del siglo XX se vienen abriendo caminos que marcan la ruta a seguir por las nuevas generaciones de ingenieros y geólogos geotécnicos. La primera de ellas, evidentemente, es el acceso global a la información a través de Internet; la segunda, una universalización de los mercados de trabajo, ya existente, pero con actual énfasis por el despegue de economías emergentes, en especial en Latinoamérica para los geotécnicos hispanoparlantes. Estas dos circunstancias convergen en la necesidad de formar geotécnicos flexibles en la resolución de problemas, y, a nuestro modo de ver, profesionales que posean un buen criterio geotécnico, siendo capaces de utilizar de forma adecuada los conocimientos adquiridos. Venimos

repetiendo que lo importante no es tanto conocer las fórmulas como saber seleccionarlas y aplicarlas. Por sí mismo, el conocimiento geotécnico no es suficiente si no se tiene la capacidad para utilizarlo correctamente en un proyecto.

Por otra parte, a lo largo de veinte años de impartir clases en el máster de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica del CEDEX hemos constatado un cambio de perfil en la procedencia y titulación del alumnado. De una práctica totalidad de ingenieros civiles egresados de universidades latinas se ha pasado a una mayoría de concurrentes españoles de diversa titulación académica.

La mención a una distinta procedencia no es un referente meramente estadístico, ya que injertar en un tronco común ramas de formación dispar exige esfuerzos complementarios a profesores y alumnos. El equipaje geotécnico no es el mismo para todos, pero el objetivo del curso es que unos y otros puedan llenarlo con las herramientas adecuadas para su ejercicio profesional.

El propósito de este artículo es proponer líneas conductoras con ese objetivo. Sin duda, aspiran a ser mejoradas, pensando siempre en que el alumno busca con frecuencia que se le den unas pautas o recetas con las que acometer los posibles problemas geotécnicos a los que habrá de hacer frente. La primera enseñanza consiste en hacerle ver que no hay dos problemas geotécnicos que puedan resolverse de la misma forma.

\* Autor de contacto: [jlpgumer@gmail.com](mailto:jlpgumer@gmail.com)

<sup>1</sup> Profesor del Máster de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica del CEDEX, Madrid, España

El nivel de conocimiento del alumno se revalida con la redacción de un trabajo final sobre un tema tratado en el curso, y que puede consistir en decantar un estado del arte sobre una determinada materia o en la puesta a punto de una metodología. El director de la tesina supe posibles carencias del aspirante, que muchas veces no son técnicas, sino relacionadas con la estructuración del trabajo y con los requisitos de incorporación al estudio de citas y referencias.

Además de una presentación visualmente adecuada, el texto debe ser gramaticalmente correcto y de fácil lectura, aspectos que hemos constatado no siempre se vigilan lo suficiente.

Siempre remarcaremos que consideramos muy formativo acostumbrarse a manejar bibliografía a lo largo del curso. Pero en la práctica, el alumno sólo parece tener tiempo para utilizarla para la elaboración de la tesina de postgrado.

Venimos recomendando, por otra parte, algunos libros de contenido no entroncado con la materia geotécnica impartida. Se trata de promover con su lectura una reflexión sobre distintos aspectos relacionados con el acontecer técnico-científico que, de un modo u otro, estará presente en el ejercicio profesional. Numerosos libros y documentos de un carácter, podría decirse que formativo, están disponibles en librerías y en Internet. El profesor Jiménez Salas recomendaba *Los tónicos de la voluntad*, del premio Nóbel Santiago Ramón y Cajal. Sumo a este librito, entre otras posibles referencias de fácil lectura, *El oficio de investigador*, de Claude Brezinski, y *Una exploración del caos al orden*, de Ilya Prigogine.

En un registro específicamente geotécnico conviene no pasar por alto la posibilidad de acceder a lo largo del curso a proyectos, que suelen ser de difícil acceso, cuya consulta se justifica por el valor práctico para el alumno de sus contenidos.

## 2. LIMITACIONES DE LA GEOLOGÍA GEOTÉCNICA

La ciencia geológica, por cuya vertiente aplicada a la ingeniería geotécnica es por la que se vierte este texto, tiene unos cometidos que son base y complemento de la disciplina geotécnica.

“Ciencia” y “técnica” son dos formas de conocimiento, pero con diferencias en su enfoque y objetivos. La ciencia trata fundamentalmente de comprender el mundo natural; este conocimiento se inscribe en teoremas, leyes y ecuaciones. Por su parte, la técnica está vinculada a la resolución de problemas que implican el control de ese medio natural; se considera una ciencia aplicada, porque utiliza leyes naturales para acometer problemas específicos.

Por consiguiente, puede decirse que la ingeniería geológica, o geología geotécnica, es una disciplina aplicada al estudio de los problemas suscitados por las actuaciones constructivas y medioambientales. El reconocimiento geológico implica a factores materiales que deben ser asumidos por el proyecto geotécnico. Este proyecto utiliza los conocimientos que le aporta la geología para modificar el entorno, a través de la ingeniería, lógicamente

Fueron, en especial, los fracasos estructurales de presas como las de San Francisco (California) y Maupassent (Francia), y de la estabilidad del vaso de la Vaiont (Italia),

los que propiciaron, a partir de los años 20 del pasado siglo, el estudio del terreno de forma rigurosa.

Estas y otras catástrofes han sido, por otra parte, trasladadas a la opinión pública para fomentar posiciones inmovilistas. En España, se está particularmente sensibilizado, no siempre por las mismas razones, hacia las obras hidráulicas. Nos ha tocado padecer las consecuencias de unos argumentos, lícitos o magnificados, cuyo reflejo han sido las trabas para llevar adelante nuestro trabajo.

En nuestro modo de razonar partimos de la vigencia del universalismo y del actualismo como principios vigentes en la fenomenología de la naturaleza: las mismas causas producen iguales efectos, cualquiera que sea el lugar y el momento. La inducción, método de razonamiento propio de las ciencias experimentales, requiere de esos principios.

El razonamiento inductivo transita de los hechos particulares a una proposición general. La hipótesis es un artificio mental que se utiliza para disponer de una explicación de un hecho, y deberá ser convalidada o desechada en la medida en que se confirme o derogue su validez. El método científico está basado en la investigación científica, que encuentra en la experimentación la prueba de la hipótesis. Mediante la deducción se verifican las hipótesis, comprobando que sean conformes con los hechos.

En nuestra andadura cotidiana por el territorio de la geología geotécnica recurrimos con familiaridad a la “suposición”, que surge, como una luminosa llama, desde nuestra capacidad de imaginar. La imaginación acude en apoyo de la realidad observada, cuando ésta no se revela de forma suficiente. Pero para que lo imaginado se afirme como verdadero hace falta una “verificación”, requisito insoslayable en la investigación científica.

Como en todo discurso lógico, la argumentación geotécnica se rige por unas premisas con las que se llega a una conclusión. El proceso racional debe ser consistente (no contradictorio entre las partes) y coherente (conforme al contexto) para ser creíble.

Desde una perspectiva histórica, la geología geotécnica es una disciplina reciente, pero tampoco son mucho más antiguas las teorías que explican, como un todo, las causas y los efectos del comportamiento geológico de la Tierra en cuanto planeta vivo.

No parece superfluo recordar que el conocimiento de la Tierra es limitado, aunque se juzgue suficiente para el desenvolvimiento cotidiano. De relevancia singular para explicar los aspectos geodinámicos de nuestro planeta es la Tectónica de Placas, una teoría geológica cuya formulación se remonta a sólo cinco décadas atrás. Esta teoría permite explicar las causas de procesos que en el pasado convocaron persistentes controversias (por ejemplo, al tratar de justificar la génesis de las montañas, la forma cambiante de las tierras emergidas o el origen de los terremotos).

El problema de aplicabilidad geotécnica del conocimiento geológico, más allá de la inherente a planos y perfiles, tiene una evidente limitación: la geología es una ciencia cualitativa, que en principio no aporta parámetros susceptibles de ser incorporados a ecuaciones geotécnicas. Personalmente hemos vivido la época en la que los estudios geológicos eran, en ocasiones, apéndices poco más que decorativos de informes geotécnicos. Se decía, irónicamente, que el trabajo geológico se reducía a determinar la

profundidad del “duriense”, bajo el “blandiense”. Pero acotar numéricamente parámetros del terreno es una tarea no siempre factible y en general complicada.

Ya a partir de las últimas décadas del pasado siglo, Biewnaswki (figura 1) y otros autores (citaremos, por sus relevantes aportaciones, a Deere, Hoek, Brown y Barton) revolucionaron la disciplina geotécnica al establecer criterios para cuantificar elementos estrictamente geológicos (orientación y estado de las diaclasas, resistencia de la roca, etc.) y aplicarlos a la valoración geomecánica de macizos rocosos.



**Figura 1.** Los profesores Z. T. Bieniawski y L. González de Vallejo, con el autor de este artículo.

Claro está que del mismo modo que antes apuntábamos que no hay dos problemas geotécnicos iguales, podemos resaltar que no existen dos macizos rocosos en los que se puedan aplicar idénticos parámetros geomecánicos. Es la singularidad (de una discontinuidad estratigráfica, de un acuífero, de una fractura) la que finalmente puede determinar la respuesta geotécnica del macizo.

Ese comportamiento es típicamente holístico, por cuanto una parte del sistema puede condicionar el comportamiento del todo. Lo adecuado es, en síntesis, considerar a cada parte no como un retrato fragmentado de la realidad total, sino como un fotograma que forma parte de una secuencia fílmica.

En la naturaleza se dan sistemas complejos en los que un planteamiento reduccionista deja espacio para el error: podemos acotar las partes, pero ello no asegura que el comportamiento del conjunto venga dado por el de la suma de las partes. No conviene, por tanto, y conceptualmente, distanciarse de una perspectiva holística en el análisis del modelo geotécnico.

Un ejemplo resulta pertinente: si sectorizamos la traza de un túnel en función de los reconocimientos realizados, cabe la posibilidad de que en uno de esos tramos una vía de agua que ha pasado inadvertida produzca un colapso del frente de excavación, repercutiendo con ello en el conjunto del túnel. Para minimizar las consecuencias de incidencias de ese tipo, habría que incorporar la tipología de la obra a la geotecnia prevista para cada tramo de la excavación, de manera que formaran una unidad indisoluble. Tiene sentido, con este argumento, modificar puntualmente el tipo de revestimiento o prever reconocimientos mediante sondeos horizontales en el propio frente de avance.

Por todo lo expuesto, es evidente que una de las primeras exigencias de un reconocimiento geotécnico es que los datos que se manejen sean representativos. Y deben serlo de cada una de las partes en que se ha sectorizado la investigación, que a su vez no deben dejar fuera ningún rincón del espacio total. Consideremos un ejemplo inmediato: la resistencia de una cadena de acero con un eslabón de cobre no la determina el valor medio de la resistencia de los eslabones totales, sino la del cobre, obviamente muy inferior a la del acero.

En resumen, los parámetros numéricos hay que tomarlos con precaución, y, del lado de la seguridad, considerar los valores más conservadores factibles. Es la experiencia la que nos advierte de las consecuencias de no contar con un conocimiento acorde con nuestro proyecto.

Esta información incorrecta puede deberse tanto a un reconocimiento geotécnico insuficiente como a una inadecuada interpretación de los datos o gestión de los ensayos. Respecto al primer supuesto, un conocido dicho geotécnico advierte de que un ahorro en investigación en fase de proyecto conlleva con frecuencia sobrecostos de obra. También hay que alertar sobre soluciones en exceso conservadoras, en especial en las grandes obras civiles. Se atribuye a Terzaghi el comentario de que una carretera en la que conseguimos que no se caiga ningún desmonte durante la construcción apunta, posiblemente, a costosos sobredimensionamientos del proyecto. Sería preferible, llegado el caso, recurrir a correcciones puntuales.

Una última consideración. Decía el dramaturgo Bernard Shaw que “la experiencia es un maestro tan implacable que primero hace pagar las consecuencias y después da la lección”. En otras palabras: se aprende posiblemente más de los errores que de los aciertos, y eso ha de tenerlo en cuenta el geotécnico.

### 3. SOBRE EL ÁMBITO DE APLICACIÓN DE LA GEOLOGIA GEOTECNICA

Para estimar la factibilidad de una obra civil es necesario acometer una investigación que permita valorar no sólo los parámetros geotécnicos de proyecto, sino, cuando el tipo de construcción lo justifique, establecer que el terreno reúne los requisitos adecuados para que la obra sea operativa en su funcionalidad prevista. Y, además, en su caso, determinar la repercusión de la propia construcción sobre el entorno.

Así, el diseño de un túnel o de un desmonte requiere no solamente que la excavación sea estable, sino que no desestabilice la zona por la que discurre (por ejemplo, debido a una modificación del nivel freático). Una consecuencia de la relación de la obra con el terreno es la incidencia medioambiental.

Por todo ello, los reconocimientos geotécnicos para una obra de cierta entidad no deben circunscribirse, normalmente, al estricto recinto donde ésta se ha de emplazar. Deben, como se ha indicado, permitir analizar su repercusión sobre el entorno de la misma; e, inversamente, la incidencia de ese entorno en la funcionalidad de la construcción. Y es, precisamente, en la interrelación de la obra con el marco natural en la que se inscribe que el estudio geológico adquiere su verdadero significado.

En este sentido, puede suceder que una construcción no presente en sí misma patologías, y que sin embargo resulte inoperante para el objetivo para el que fue concebida. La literatura geotécnica recoge ejemplos de fracasos funcionales por un conocimiento inadecuado de las condiciones de contorno. (En nuestras clases de máster citamos la presa de Montejaque, en Málaga.)

Naturalmente, no todos los aspectos relacionados con el terreno tienen la misma consideración geotécnica. Con carácter general, las materias geológicas de mayor interés están vinculadas a las propiedades intrínsecas de las rocas y de los suelos, a las características hidráulicas del medio y a los procesos dinámicos naturales, tanto de origen gravitacional (desplazamientos en masa) como geodinámico (asociados a sismos).

En la figura 2 se esquematizan aspectos geológicos geotécnicamente relevantes. Estos aspectos, estudiados por medio de disciplinas concretas, configuran contenidos básicos para el estudio de la geología aplicada a la ingeniería civil. Es conveniente recalcar que, normalmente, un buen conocimiento (y criterio) geológico resulta necesario para concretar un buen proyecto geotécnico.

Una de las premisas que se requieren para que exista una adecuada sintonía entre quienes han de manejar los contenidos geológico-geotécnicos de un proyecto, es compartir una terminología adecuada.

No es una cuestión menor, por ejemplo, saber de qué se está hablando cuando se nombra el sustantivo “suelo”. Este vocablo no tiene el mismo significado para un geotécnico que para un edafólogo o un urbanista. Se produce, en este caso, una polisemia, ya que la palabra comparte varios campos semánticos. Esta peculiaridad deriva de la propia etimología de la palabra, el latín “solum”, que venía a significar, sencillamente, el lugar por donde una persona camina. Sirva este ejemplo para advertir de la disparidad que en sus diversas acepciones puede tener un término en principio tan sencillo como suelo.

El lenguaje técnico ha de ser, ante todo, preciso. Esta concisión requiere conocer las peculiaridades que confieren identidad a aquello que se identifica. Algo que no siempre es inmediato. Así, en el ejemplo anterior, la clasificación de un suelo edáfico en vertisol o podsol requiere la constatación de que el suelo tiene unas características concretas que permiten identificarlo como tal. Como geotécnicos, ese tipo de información nos resulta marginal. Pero no del todo: así, un vertisol, por su contenido en arcillas esmécticas, resulta ser un suelo con capacidad expansiva. Claro que nosotros hacemos un ensayo específicamente geotécnico para valorarla, y lo clasificamos, en su caso, como suelo expansivo, y no como vertisol.

Pero con independencia de estos aspectos concretos de la geología geotécnica, es fácil comprender que la información geológica, con carácter más general, necesita ser comprendida por el ingeniero civil para que pueda sacar provecho de ella. La terminología geológica no resulta útil para el ingeniero si no puede ser asumida por el lenguaje geotécnico. Así, saber, sin más, lo que en verdad designa el término “marga”, permite asumir determinadas propiedades de este material, que no se valorarían de forma directa si no se visualiza el “roca-suelo” que concreta este nombre.

Estas reflexiones justificaron la inclusión de un “Glosario geológico-geotécnico y de términos relacionados”, que forma parte de nuestra monografía *Diccionario Guía de Reconocimientos Geológicos para Ingeniería Civil*, editada por el CEDEX.

Conviene recordar el marco espacial y temporal en que se desenvuelve la actividad geotécnica. Los cambios fisiográficos se producen, salvo episodios singulares, a un ritmo geológico, ya que los procesos que los determinan lo hacen muy lentamente. Demasiado tiempo si se compara con la vida útil de una construcción, por lo que sólo se los tiene en cuenta para el proyecto cuando los períodos de recurrencia de fenómenos geológicos con incidencia directa

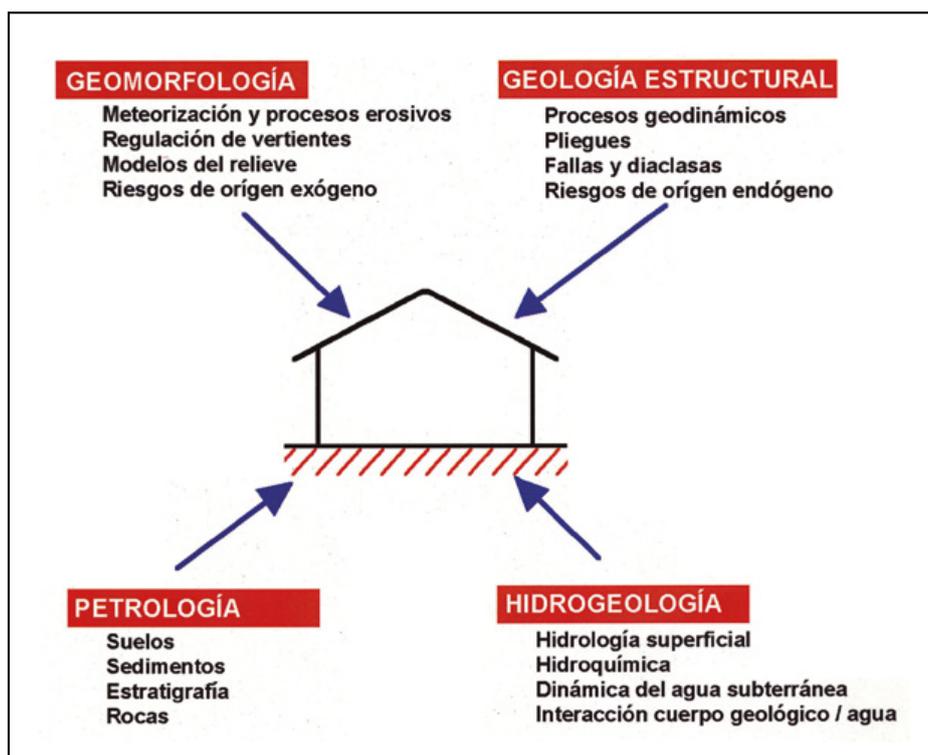


Figura 2. Disciplinas geológicas y materias asociadas implicadas en la investigación geotécnica.

sobre la obra o el terreno son compatibles con la vida útil de la construcción. Así sucede con la ocurrencia de terremotos en zonas de sismicidad elevada, o con la posibilidad de avenidas en obras que interfieran cauces no regulados.

Pero esta regla no concede treguas indefinidas. De vez en cuando acontece que la aparente calma de la naturaleza oculta violentos despertares, a veces con consecuencias trágicas que reclaman la atención pública desde los titulares de los noticiarios. Sucede que la inestabilidad del terreno puede estar en un estado de “latencia”, y es una acumulación de procesos la que puede despertarla. A lo largo de los años nos hemos enfrentado a patologías de este tipo, en general asociadas a períodos de pluviosidad elevada. Estos ciclos húmedos pueden generar intensas escorrentías, provocar avenidas con caudales extraordinarios o producir una saturación de los materiales. Las consecuencias pueden ser socavaciones, anegamientos y movimientos en masa del terreno, muchas veces con afección directa a construcciones y a vías de comunicación (figura 3).



**Figura 3.** Patologías en la CN-323 por deslizamientos de ladera, en un tramo con estabilidad preliminar precaria, y destrucción de muros de tierra armada, como consecuencia de un largo período de precipitaciones.

En los valles más o menos profundos, las laderas están con frecuencia cubiertas por mantos coluviales. Obviamente, la presencia de estos recubrimientos ya implica que se han venido dando movimientos de ladera. Modificar las condiciones de contorno puede desencadenar nuevos desplazamientos en masa. Un ciclo húmedo, o un sismo, restablecen los movimientos en esa ladera, que busca nuevos perfiles de equilibrio a medida que el río profundiza su cauce. Evidentemente, en ocasiones son factores antrópicos (por ejemplo, un desmonte asociado a una mejora del trazado de una carretera que discurre al pie de la ladera) los que interfieren en la evolución natural del talud. Algunas veces nos hemos visto implicados en inestabilidades de ese tipo, y siempre hemos defendido que hay que tener una cierta perspectiva histórica para enfrentarse a este tipo de patologías.

Las poblaciones que miran al futuro desean mejorar sus comunicaciones. Es lógico. Como lo es también que demanden nuevas viviendas. Pero a veces no se construyen como se debiera, sino que, por ejemplo, se levantan invadiendo cauces que la memoria colectiva no registra como funcionales... hasta que vuelven a serlo. Los períodos de

retorno de un acontecimiento pueden ser suficientemente espaciados en el tiempo como para que no exista constancia histórica de los mismos. Igual sucede con laderas o con antiguos vertederos que se “vienen encima de las viviendas” (hemos escuchado esta frase más de un vez), levantadas junto a zonas potencialmente inestables.

En ocasiones, el origen del mal geotécnico está oculto, y, cuando se manifiesta, los afectados buscan culpables, sin querer admitir que la causa del suceso sea “natural”: consecuencia de una falta de previsión o de una insuficiente información. Tenemos en mente un trabajo, con repercusión judicial, en el que se investigó el origen de los daños sufridos por algunas viviendas de una pequeña urbanización. Se detectó un hundimiento en una antigua mina de yesos como causante de la patología. La existencia de la explotación subterránea la delataba ya el propio nombre de una de vías de acceso a las viviendas: “Calle de la Mina”. Pero a los afectados no les interesaba, en este caso, conocer la causa de la precariedad del lugar en que habían construido las viviendas. Lo que en verdad perseguían era una indemnización por presuntos daños atribuidos a una carretera que se demostró nada tenía que ver con la afección.

La investigación de cavidades subterráneas, convertidas en problema geotécnico, es siempre compleja, siendo además necesario asumir relevantes incertidumbres en su localización y dimensionamiento. Se impone, llegado el caso, tratar de evitar construir en las zonas en que se hayan detectado, o exista la posibilidad de que existan, huecos ocultos. Una alternativa puede ser acotar terrenos donde la posibilidad de ocurrencia de colapsos o subsidencias del terreno sea mayor, y destinarlos a usos complementarios. En el transcurso de uno de nuestros primeros trabajos profesionales se detectó un accidente kárstico (en concreto, una dolina), junto a otros menores, en el solar de la Unidad Alimentaria de Mercamadrid. En la parcelación del solar, se ubicaron en esa zona los viales de acceso, tal y como pueden verse hoy, dejando amplios espacios sin construir.

En la actividad geológico-geotécnica se impone, como un valor incuestionable, la prudencia. Conviene recordar la premisa del filósofo empirista, creador del moderno método de estudio científico, Francis Bacon: “A la naturaleza sólo se la domina si se la obedece”. Esta prudencia debe ir coaligada con un cierto sentimiento de respeto hacia la naturaleza, una actitud que no es únicamente ética, puesto que se codifica a través de la gestión medioambiental.

Para concluir este capítulo haremos algunas consideraciones sobre las aplicaciones informáticas en geotecnia. Sin duda hoy son imprescindibles, pero esto no puede hacernos perder de vista un trabajo geotécnico más “pegado” al terreno, por decirlo de algún modo.

Las herramientas informáticas vienen a ser unas escaleras automáticas que evitan tener que subir los peldaños a pie. Es verdad que a veces no existen, o no son ya eficaces, esos procedimientos “manuales” con los que hasta hace no mucho tiempo nos manejábamos para interpretar, modelizar o proyectar. Pero los nuevos atajos no deben llevarnos a olvidar que la base del buen criterio geotécnico se apoya en el conocimiento directo de los elementos que conforman la realidad geotécnica.

Así, debemos saber que un suelo es arcilloso porque no distinguimos los granos, porque podemos moldearlo y porque además se nos pega a los labios. Un análisis

granulométrico por tamizado confirmará que la mayor fracción del suelo no la retiene el tamiz de 4 micras. Pero si se opera de otro modo, sin conocer la realidad física de ese suelo, ¿qué error cometeremos si el ensayo no está correctamente realizado? Puede suceder que la muestra no se haya deshecho completamente en el proceso de preparación y conserve grumos de tamaño limo. Es por ello que los ensayos deben ser interpretados desde una adecuada presunción. Con similar criterio, el modelo gestionado mediante un programa informático debe ser conforme con la representación mental previamente imaginada para el mismo.

#### 4. LINEAS CONDUCTORAS EN LA ENSEÑANZA DE LA GEOLOGÍA GEOTÉCNICA

Casi como en cualquier actividad humana, en los reconocimientos geotécnicos lo inesperado siempre tiene cabida, en mayor o menor grado, así es que debemos estar preparados. No hay que dejarse sorprender por la sorpresa.

El ámbito de aplicación de la geología geotécnica son los trabajos de campo, circunscritos a la toma de datos geológicos y a la realización de ensayos de carácter geotécnico.

Este reconocimiento tiene que ver con las siguientes preguntas:

- ¿Para qué lo hacemos?
- ¿Por qué lo hacemos?
- ¿Cómo lo hacemos?

Se trata de tres consideraciones que llevan, de forma consecutiva, de la una a la otra, y que se dilucidan entre quienes llevan a cabo las campañas de campo.

La primera de esas cuestiones, en la que nos preguntamos y nos respondemos “para qué” se realiza la investigación, es conveniente que sea compartida, hasta donde sea factible hacerlo, por todos los implicados en la misma. No es infrecuente que el personal que trabaja en campo, por ejemplo perforando sondeos, desconozca el objetivo de su actividad. La experiencia demuestra una mejor disponibilidad si se le informa, en este caso, de para qué se hacen los sondeos. Con ello se le da a entender lo importante que es que se perforen correctamente, más allá de lo que impongan los pliegos de ejecución, que no siempre pueden ser directamente supervisados. Es un modo de implicar más en su trabajo a los encargados de llevarlo a cabo.

La segunda cuestión que cabe plantearse es “por qué” se hace el reconocimiento. Esta pregunta implica compartir con quienes lo realizan la información que esperamos obtener con la investigación.

La última de las cuestiones planteadas es, muchas veces, la única a la que tiene acceso el personal de campo. Además de recogerse en los correspondientes pliegos de ejecución, el “cómo se hace” implica compartir la metodología utilizada para dilucidar el por qué lo hacemos.

Un ejemplo aclarará las anteriores cuestiones. Supongamos que necesitamos conocer, a efectos de un cálculo de estabilidad, la presencia de agua subterránea. El *para qué lo hacemos* puede ser que necesitamos conocerlo para proyectar una excavación. El *por qué lo hacemos* ya nos es conocido: comprobar la existencia o ausencia de agua en el

terreno. El *cómo lo hacemos* podría implicar la perforación de un sondeo y la acotación, si existe, del nivel de agua en la perforación.

En resumen: la experiencia nos dice que facilitar en lo posible una visión global de los objetivos de un reconocimiento de campo a aquellos que sólo intervienen en una parte del mismo mejora la implicación del personal y la buena gestión de los trabajos.

Evidentemente, dar una respuesta adecuada a las dos primeras cuestiones permite un mayor rigor en el momento de aplicar criterios para dilucidar el *cómo lo hacemos*.

Tener criterio es una cualidad imprescindible en la práctica geotécnica, cualidad que suele estar asociada a la experiencia. En un mundo de acceso universal e instantáneo a la información, no parece difícil conseguir fórmulas y programas. Esta facilidad puede llevar a sobrevalorar nuestros conocimientos. El creer estar seguro de algo que en realidad se desconoce puede conducir a inesperados fracasos. La modestia es una adecuada actitud geotécnica: estar en posesión de una metodología no implica saber aplicarla correctamente. El buen criterio geotécnico es el tamiz que permite separar lo correcto de lo inadecuado.

De acuerdo con las materias que consideramos adecuadas para sustanciar el cimiento geológico del aprendizaje geotécnico, planteamos el siguiente índice de contenidos como una hoja de ruta, dividida en tres tramos, que debe ser recorrida para acceder a ese aprendizaje:

##### Bloque 1: Conceptos y conjeturas.

1. Geología y geotecnia, ramas del árbol de la geociencia.
2. De la especulación intuitiva a la explicación racional.
3. Poniendo números al terreno.
4. El reconocimiento geotécnico.
5. Reduccionismo y analogía.
6. Geología y geotecnia, puntos de convergencia.
7. El factor escala: dimensión y tiempo.
8. El lenguaje de las apariencias: las trampas del exceso de confianza.
9. Aprendiendo de los errores: del fracaso funcional a la patología de la obra.

##### Bloque 2: Modelos y materiales.

1. El ciclo geológico, ejemplo de reciclado de la naturaleza.
2. El marco natural, ámbito de la geología geotécnica.
3. El soporte físico; geomateriales.
  - Rocas: génesis y clasificación.
  - Las rocas ígneas
  - Meteorización y desplazamiento de los materiales.
  - Suelos relictos y suelos transportados.
  - Del sedimento a la roca sedimentaria.
  - Rocas metamórficas.
4. El agua superficial y el agua subterránea.

5. Geodinámica externa: los rostros del paisaje.
6. Geodinámica interna: roturas y deformaciones
7. La adecuación geotécnica de los datos de campo. Estaciones geomecánicas.
8. Planos y perfiles litogeotécnicos: una visualización necesaria para la toma de decisiones
9. Mapas temáticos.

### Boque 3: Métodos y herramientas

1. *Mente y martillo*: ver, tocar e imaginar, trabajo del geólogo en el campo.
2. Un estudio con múltiples condicionantes: emplazamiento, terreno, tipo de obra, afección, importancia, tiempo, presupuesto.
3. Estrategia del reconocimiento geotécnico: optimizar los medios sin agotar los recursos.
4. Táctica de la evaluación: ir de lo general a lo singular.
5. Valoración del terreno: investigaciones puntuales, prospecciones interpolativas y ensayos directos.
6. Caracterización de parámetros de implicación geotécnica:
  - Documentación, teledetección, observaciones de campo.
  - Reconocimientos puntuales: catas y sondeos mecánicos. Toma de muestras.
  - Ensayos mecánicos sobre el terreno e instrumentación.
  - Prospección geofísica de superficie y en sondeos.
  - Ensayos de laboratorio: de identificación, de estado y de caracterización.
  - Pruebas hidrogeológicas.
7. Impactos mediáticos y medioambientales.
8. Los peajes de los trabajos de campo.
9. *Lex Artis* = experiencia + sentido común.

Evidentemente, estamos presentando un programa de síntesis, que precisará ser ampliado en determinadas materias, de acuerdo con su interés práctico. Conocer el funcionamiento de las máquinas y métodos de perforación, así como de la toma de muestras, profundizar en los ámbitos de aplicación de las prospecciones geofísicas y en los ensayos geotécnicos sobre el terreno, ejercitarse con la toma de datos y su tratamiento en estaciones geomecánicas y penetrar en ese mundo propio en que se desenvuelven las aguas subterráneas son altos en el camino. Todas estas materias, relacionadas con la geología geotécnica, y algunas más, son sujeto de un estudio minucioso en clases monotemáticas.

Subrayaremos, por otra parte, que pretendemos que en el aula se vaya tomando contacto con trabajos originales que han supuesto grandes saltos del saber geotécnico. Opinamos que es como acceder a las materias primas del plato en que basamos nuestra cocina. Hacemos hincapié en la importante aportación para la difusión del conocimiento geotécnico en España de las publicaciones que ha venido editando el CEDEX (figura 4), y que en la actualidad se concretan en monografías y en la revista *Ingeniería Civil*.



Figura 4. Boletín de Información editado por el CEDEX .

## 5. COMENTARIOS SOBRE EL TEMARIO PROPUESTO

En el transcurso de las 6 horas que completan nuestro horario de clases en el Máster de Ingeniería Geotécnica del CEDEX hemos venido desarrollando los conceptos y las materias contenidos en el menú temático antes presentado.

Pero antes de analizar los contenidos de nuestra enseñanza, nos referiremos a un cuestionario que, para tomar el pulso de la cultura geotécnica del alumnado, presentamos al inicio de las clases. Con este cuestionario pretendemos, fundamentalmente, suscitar reflexiones sobre el alcance de las preguntas, cuyas respuestas no siempre resultan ser tan evidentes como pudiera parecer. En síntesis, queremos alentar esa curiosidad por el saber que debiera ser motor de conocimiento de los alumnos.

El test es el siguiente (algunas de las preguntas cambian cada año):

### CUESTIONARIO DE SENSIBILIZACIÓN GEOTÉCNICA

1. El RMR valora la resistencia al corte de un macizo rocoso.
2. Una muestra inalterada se conserva en una cámara con control no de temperatura, sino de humedad.
3. Para controlar mediante un taladro si una ladera se mueve en profundidad es mejor dejar un lastre en el fondo del sondeo que introducirlo por la boca para comprobar hasta dónde baja.
4. Una arcilla expansiva cambia de volumen sólo cuando se modifica la humedad.
5. Los lodos bentoníticos se emplean para estabilizar las paredes de una perforación en terrenos flojos.

6. Un suelo 100% arcilloso tiene más porosidad que otro 100% arenoso.
7. Para valorar la excavabilidad del terreno se utiliza la sísmica de refracción y no perfiles de geofísica eléctrica.
8. En los cortes litogeotécnicos del terreno no tienen necesariamente que coincidir la escala vertical y la horizontal.
9. La permeabilidad de suelos arcillosos consolidados se mide en la célula triaxial.
10. El contenido de humedad de algunos suelos arcillosos pueden ser superior al 100%.

*Puntuación:*

Respuesta afirmativa = 1

Respuesta negativa = 0

Como se ha indicado, este cuestionario lo presentamos al comienzo de nuestras clases, sin entrar en detalles. Al finalizar la primera hora volvemos a visualizarlo, requiriendo que cada alumno valore, verbalmente, el cuestionario. Al ser todas las respuestas afirmativas, la evaluación total debería ser 10. No obstante, año a año, la puntuación media se repite, alrededor de 6. Lo que resulta revelador es que una mayor experiencia en trabajos profesionales ya realizados por el alumno se refleja en puntuaciones más altas. Por otra parte, las mejores respuestas las aportan alumnos que luego tendrán un mejor rendimiento en el máster. Pensamos que el debate final sobre las cuestiones planteadas suscita un beneficioso ejercicio de reflexión, además de ayudar a romper posturas reservadas propias de los primeros días de clase.

Volvamos a nuestro índice temático. Los tres bloques en que hemos dividido los contenidos discurren desde un marco conceptual hasta los modos de operar propios de los reconocimientos geotécnicos.

En el primer bloque, “Conceptos y conjeturas”, se incluyen aspectos que tienen que ver con la construcción de unas bases de partida para recorrer el espacio en el que habita la geología geotécnica. Partiendo de unas coordenadas terminológicas, se recogen aspectos que permitirán transitar con más seguridad y fundamento por futuros trabajos, asumiendo las limitaciones a que se ha hecho referencia en un epígrafe anterior. Más adelante completaremos algunas de las pautas de actuación que nos parecen más relevantes en su plasmación práctica.

Reiteramos que el ámbito de nuestro trabajo son las geociencias. Este campo del conocimiento agrupa el conjunto de disciplinas implicadas en el estudio físico de la naturaleza, para lo cual ya sabemos que se utiliza una metodología experimental.

Anteriormente hemos subrayado que el razonamiento geotécnico se estructura mediante unas premisas que cimentan una conclusión. Una vez revisado el contenido de ese proceso mental, se insistirá ahora en su proyección en los aspectos que nos ocupan.

Hemos visto que la complejidad del campo natural requiere planteamientos reduccionistas en la modelización del terreno, lo que se realiza mediante el análisis y la síntesis. El análisis requiere una visualización de conjunto y con la síntesis el territorio objeto de estudio se compartimenta en parcelas, cada una de ellas con características

homogéneas y diferenciadas de las del resto. No debe quedar marginado ningún aspecto de relevancia geotécnica.

El texto que acompaña, por ejemplo, a una hoja geológica, requiere la fragmentación del territorio que refleja la cartografía. Cada una de las partes en que se divide la memoria describe aspectos que tienen sentido por sí mismos, pero sobre todo porque entre todos nos aproximan a la realidad. La síntesis consiste, ante todo, en extraer los colores primarios de la realidad para poder combinarlos en función de nuestras necesidades.

Recurriendo a un símil de uso en la cocina de creación, el todo es más que la suma de las partes, del mismo modo que una tortilla de patata es más que una adición de sabores a huevo y a patata (sabe a “tortilla”). Por consiguiente, habríamos de “deconstruirla” si hubieramos de reconocer los ingredientes primarios. Parece evidente que, comparativamente hablando, es un proceso de “deconstrucción” el que efectuamos cuando fragmentamos la realidad geotécnica para estudiarla. Como señala la Real Academia Española, la deconstrucción equivale a “desmenuar analíticamente los elementos que constituyen una estructura conceptual”.

Trasladado al ejercicio geotécnico, sin embargo, lo que sucede es que el comportamiento real del terreno no tiene porqué venir determinado únicamente por la respuesta individual de las partes consideradas. Un planteamiento de conjunto resultaría más adecuado que el de un mero reduccionismo.

En especial, son necesarios establecer unos postulados o protocolos para esquematizar en tramos secuenciales el terreno, y ello requiere una cierta aceptación de que se trata de aproximaciones a la realidad. Los medios geológicos no son homogéneos, por más que los parceledemos, y de esa heterogeneidad nos informa la investigación geológica.

Básicamente, el reduccionismo consiste en pasar de una situación de desorden, difícilmente gobernable, a otra de orden en la cual podemos adentrarnos con cierta confianza. El problema sigue siendo el grado de incertidumbre que se esté dispuesto a asumir. La relación entre lo que conozco y lo que podría llegar a conocer se confirma como una duda casi con regusto metafísico.

En la resolución de patologías geotécnicas se consideran “analogías”: el sentido común se dirige hacia soluciones que han funcionado en casos similares. Forma parte de la investigación verificar que se trata de situaciones equiparables. No basta con parecer que lo son. Aunque las apariencias no engañen, podemos ser víctimas de sus equívocos; se trata de trampantojos que a veces no acertamos a discriminar de la realidad. Llegado el caso, la decisión es optar por soluciones que no sean irreversibles.

Un planteamiento reduccionista requiere un modelo de síntesis representativo. Los fracasos se producen muchas veces, precisamente, por no haber tenido en cuenta un elemento inadvertido o insuficientemente valorado en los trabajos de reconocimiento. Puede ser, por ejemplo, una falla en la traza de un túnel. Es el elemento más desfavorable el que puede determinar el comportamiento global.

En el ámbito de la realidad, los aspectos considerados se concretan en que hay que definir para los trabajos de campo una equilibrada campaña de reconocimientos geotécnicos, estructurada sobre la representatividad de los datos obtenidos y con los recursos técnicos y humanos

disponibles, y de acuerdo con las características geológicas del territorio y la tipología de la obra propuesta.

Diremos, para finalizar los comentarios sobre los contenidos de esta primera parte del índice temático, que la observación geotécnica nace con una dificultad consecuente a la disparidad de las escalas espacial y temporal de los fenómenos naturales y la escala propia del desenvolvimiento humano.

El segundo tramo de los bloques geotécnicos considerados se centra en los “modelos y materiales”, y propone un cuerpo de materias menos abstractas que el anterior bloque temático. Se ocupa de los tipos, génesis y características de los materiales geológicos. En el desarrollo de estas cuestiones, se procura enlazar unos temas con otros, como sucede en el mundo real: génesis primaria de las rocas, exhumación, degradación, transporte, deposición, litificación y metamorfismo son partes de un ciclo natural. Estos ciclos litológicos se integran en los procesos geodinámicos que modelan los paisajes y en las fuerzas endógenas desencadenantes de los procesos tectónicos.

En los ciclos geológicos tienen cabida las aguas. El agua subterránea se coloca en un primer plano del interés geotécnico, por su interacción con rocas y suelos.

Entre otros temas, en este bloque se focaliza la atención sobre los mapas y los perfiles geológico-geotécnicos, de implicación manifiesta en los proyectos. Se presentan asimismo mapas temáticos, enfocados hacia temas específicos, algunos de los cuales, por su contenido o por su metodología, habrán de sernos más de utilidad. En especial, los mapas de riesgos geológicos formarán parte de nuestra cotidianidad geotécnica si hemos de hacer frente a proyectos de cierta entidad.

Hemos agrupado en el tercer bloque, “métodos y herramientas”, el análisis de los recursos, aspectos y materias concretas de que se vale la geología geotécnica, así como de las pautas que consideramos deben ser seguidas para su implementación en un proyecto geotécnico estándar.

“Con la mente y con el martillo” es un lema clásico en geología, que sintetiza que el trabajo de campo requiere ver mucho el terreno (“patearlo”), manosear bastante los materiales y razonar de una forma imaginativa.

Hablamos de unas estrategias en el planteamiento de los reconocimientos geotécnicos, aludiendo a que éstos deben orientarse hacia una utilización ajustada y plausible de los recursos de que dispongamos.

Definimos la “estrategia” como el conjunto de decisiones que nos llevan a optimizar los recursos de que dispongamos. Esto puede conseguirse conjugando los diversos factores implicados en nuestra investigación: tipo de la obra, características del terreno, afecciones medioambientales, tiempo de realización, presupuesto disponible y limitaciones en el acceso y en la implementación de algunas de las herramientas con las que en principio contamos.

Esta última cuestión es relevante, y no siempre nos consta que sea prevista. En algunos trabajos nos hemos encontrado con servidumbres de paso, emplazamientos no factibles para determinada maquinaria, limitaciones medioambientales, necesidad de permisos, presiones sociales, etc., aspectos que ralentizan e incluso impiden una parte de los trabajos previstos.

Un caso singular son los reconocimientos geotécnicos en espacios o conjuntos monumentales protegidos. Lo

habitual es que la investigación la proponga el organismo competente, de manera que, con las restricciones y la supervisión que dictamine, no suelen darse otros problemas que los asociados al método de trabajo y al propio tipo y puesta en servicio de la maquinaria y aparatos de ensayo o instrumentos de control seleccionados. Como es lógico, las técnicas no destructivas son de uso preferente en estos entornos.

Como compensación al cuidado que es necesario tener en las campañas de reconocimiento, incluso a la lentitud que hay que imprimir al desarrollo de las mismas, este tipo de actuaciones son fuente de satisfacción tanto en el plano profesional como en el personal. Los trabajos, por el hecho de que han de ser interdisciplinares, resultan mutuamente enriquecedores para los técnicos, de distinta especialización, implicados en el estudio.

La investigación que compartimos con otros compañeros del CEDEX sobre las condiciones de cimentación de La Alhambra y El Generalife, que ha sido en este sentido la más relevante en la que hemos intervenido, supuso, además de sustanciosas conclusiones contenidas en los informes emitidos, un catálogo prolífico de actividades relacionadas con el estudio efectuado. Trabajos de este tipo nos reafirman en la convicción de que siempre resulta factible no traspasar las líneas rojas proteccionistas ateniéndose a las necesidades prácticas asociadas a la investigación.

Otro tipo de situaciones restrictivas que hemos conocido se relacionan con el clima (en condiciones extremas, por ejemplo, puede llegar a helarse el agua de los sondeos), con las dificultades topográficas para acceder a la zona de trabajo y con limitaciones derivadas de la necesidad de permitir el paso de vehículos. Muy ocasionalmente se nos han impuesto paradas en las campañas asociadas a la temporada de caza o a períodos de reproducción de fauna protegida. Desde luego, se trata de situaciones, por fortuna, poco habituales.

La estrategia del reconocimiento geológico requiere planteamientos preliminares de los trabajos de campo que tengan en cuenta esas posibles restricciones. Optimizar los recursos conlleva, además, no agotarlos en la planificación previa al inicio de la campaña. Con ello se consigue, o se debe lograr, evitar incrementos de costes o del tiempo previsto para los trabajos (“En el precio convenido y en el plazo comprometido”, es un atinado lema de una conocida empresa de construcción).

En nuestra opinión, los pliegos no deben ser muy estrictos (a veces esta rigidez trata de suplir la falta de supervisión directa de los trabajos). Hay pliegos de ejecución de sondeos que con el propósito de apuntalar los precios hacen presupuestos irreales (si conociéramos los metros que se van a perforar en suelo o en roca dura ¿para qué necesitamos muchas veces los sondeos?).

Es preferible establecer indicaciones más generales, dentro de lo que se puedan ajustar las partidas. Una dificultad puede ser, por ejemplo, aquilatar a priori las profundidades de los sondeos: podemos quedarnos cortos o gastar metros de más. Parece más lógico pedir penetrar unos metros en el sustrato que queremos acotar, si éste es el caso, promediando, en función los datos que se manejen, unas longitudes de perforación estimadas en su conjunto y distribuidas entre el número de sondeos requerido. De modo similar puede dilucidarse el número de muestras que hay

que extraer o el de los ensayos in situ que sean precisos. El objetivo es siempre hacer una testificación realmente representativa, que incluya a todos los materiales que interesa caracterizar. Evidentemente, unos pliegos más abiertos requieren tomar decisiones en fase de perforación, lo que impone una supervisión técnica de los sondeos.

Para optimizar los medios (técnicos y humanos) implicados en una campaña geotécnica es conveniente acotar el ámbito de su utilización, los objetivos del reconocimiento y las limitaciones inherentes a cada elemento implicado en el trabajo. Una premisa esencial es adecuar el estudio geotécnico del emplazamiento a la realidad natural, lo que implica que los reconocimientos geológicos hayan de ser lo más completos y precisos posibles ya desde las primeras fases de la investigación.

En los trabajos de campo enfocados hacia la valoración geotécnica de macizos rocosos, la investigación incluye la medida de datos estructurales, que han de ser tomados en superficie (estaciones geomecánicas) y extrapolados a la profundidad requerida, con el apoyo de sondeos.

La estructuración de la investigación geotécnica requiere procedimientos de actuación de carácter “táctico”. Podría decirse que la táctica consiste en partir de unos reconocimientos de distribución más general e ir reduciendo el ámbito de los mismos en función de los resultados que se vayan obteniendo y de las incógnitas que se vayan despejando.

Para seguir esta pauta, como ya hemos mencionado, es necesario dividir el territorio en tramos geotécnicamente equiparables de acuerdo tanto con las características geológicas del terreno como con la entidad y tipología de la obra.

La primera tarea a acometer es encuadrar el lugar de estudio. Resulta factible, a partir de datos documentales, obtener una información más o menos detallada que permita acceder a datos empíricos y que, en todo caso, facilitará la articulación de un estudio detallado. En esta fase, se persigue obtener parámetros cuantitativos de los conjuntos previamente identificados, aquilatar sus límites y definir los trabajos de reconocimiento y toma de muestras.

Las herramientas instrumentales que acompañarán al geotécnico en sus trabajos de campo pueden estar vinculadas a reconocimientos puntuales, como son las catas y los sondeos mecánicos, los ensayos in situ y la instrumentación a que hubiera lugar. Los reconocimientos que prospectan una franja de terreno se consideran “integradores”, ya que se apoyan en los puntuales para la interpolación de datos litológicos y estructurales. Incluyen extendimientos geofísicos en superficie y diagráfias en sondeos.

Otras materias que forman parte del índice temático en este tercer bloque son la toma de muestras, los ensayos de laboratorio (de identificación, de estado y de caracterización) y las pruebas hidrogeológicas.

Lógicamente, la densidad y tipología de la toma de datos varía desde los reconocimientos visuales, meramente cualitativos, en fase de estudio previo, a los de la investigación con los medios reseñados, para el proyecto de construcción.

En el trascurso de las campañas de campo pueden surgir problemas que no siempre son de raíz geotécnica. Los medios de comunicación llevan a veces a un primer plano posiciones que no siempre buscan conciliar el lícito respeto al medioambiente con la necesidad de poner los recursos

naturales al servicio del progreso, mediante un uso racional de los mismos. La explotación de recursos hidráulicos, la implantación de depósitos de seguridad o la mejora de vías de comunicación ha contado, en ocasiones, con una oposición frontal que dificulta los reconocimientos geotécnicos, e, incluso, ha llevado a abandonar proyectos, o a introducir en ellos modificados que los desnaturalizan. Alguna vez nos ha tocado sufrir acciones que no buscaban hacer más segura la obra, sino, sencillamente, impedirlo. En reuniones con grupos de presión hemos dejado clara la posición que nos correspondía, estrictamente técnica: lo que es bueno para el proyecto resulta ser malo para los que defienden unas posturas que no aportan alternativas.

En este contexto de rechazo social suele inscribirse el empleo de herramientas isotópicas, como puede ser el uso de trazadores para investigar fugas de embalse. En este sentido, la legislación aplicable establece unas rigurosas medidas de control que garantizan una seguridad que no siempre quiere ser reconocida.

Cuestiones como a las que se acaba de hacer referencia nos llevan a un aspecto interesante para el normal desenvolvimiento de la profesión: el debate ético. Un contraste de opiniones que, sin embargo, pocas veces lo hemos visto formar parte de discusiones técnicas. ¿Hasta dónde nos es lícito dar como ciertos modelos geológicos o geotécnicos que sabemos pueden no serlo? No se trata de no equivocarse, sino de dar por buenas interpretaciones que requerirían enfoques alternativos o implicar más medios de reconocimiento del terreno, o más tiempo, para verificarlas.

Apurando nuestro vaso de reflexiones, más o menos cercanas a nuestra actividad técnica, en ocasiones podemos enfrentarnos a un conflicto ético. A nosotros nos ha sucedido. El hallazgo de restos arqueológicos o paleontológicos plantea una disyuntiva difícil de resolver. Denunciar el hallazgo puede conllevar paralizar los trabajos. Dejamos la decisión abierta.

Sabemos que las interpretaciones no tienen por qué ser únicas. Nuestra opinión es que dos puntos pueden unirse por líneas quebradas, no necesariamente rectas. Si la opción adoptaba resuelve al problema, la línea seguida no invalida que otras no hubieran sido asimismo eficaces (o ineficaces, si no dieran resultado).

El ejercicio de la profesión acumula saberes a partir de la experiencia, y ese conocimiento se suma a lo ya aprendido, que en su mayor parte procede de ese saber acumulativo que facilita que la humanidad progrese.

En este sentido, cabe referirse a la expresión *lex praxis*, cuyo significado literal es “ley del arte”, y que implica un buen ejercicio en el quehacer profesional. En nuestro caso, el buen hacer geotécnico; es decir, que la actividad geotécnica se ajuste a lo que debe hacerse.

La *lex artis* constituye, por tanto, un principio rector de actividad. Por ello, una *mala praxis* significaría no cumplir razonablemente con los criterios considerados como buena práctica geotécnica.

El buen hacer se relaciona con tener criterio y con saber aplicarlo. El tener criterio surge, normalmente, de la experiencia, y el saber aplicarlo emana del sentido común geotécnico. Por ello, una *buen praxis* la resumimos como una suma de experiencia y de sentido común. Una no deseable *mala praxis* se corresponde con actuaciones marcadas por la negligencia.

Diríamos que el trabajo de campo no sólo se conjuga en presente. Al menos en lo referente a los sondeos mecánicos, conviene habilitarlos para que puedan seguir aportando información en el futuro, si es que fuera necesario. Puede parecer una recomendación superflua, pero la embocadura de los sondeos debe quedar protegida una vez finalizada la perforación (si se trata de suelos, equipados con tubería ranurada), y señalizada si se emplazan en una zona en obras.

Esta precaución, ha permitido, en algún caso, hacer una testificación geofísica de sondeos antiguos, en los que las cajas y los registros de los testigos se habían perdido. En este sentido, una tendencia que no hemos constatado que prosperase es hacer sondeos a destroza en rocas, o mediante roto-percusión o sin recuperación de testigo en suelos, sustituyendo la testificación real por una geofísica. Estos procedimientos de perforación son más rápidos y baratos que los convencionales en geotecnia. Probablemente, la necesidad de disponer de muestras, ha hecho que este camino (que sepamos) no prosperase; aún disponiendo de herramientas tan poderosas como el *geo-logger*, que permite, incluso, acotar la desviación horizontal de la perforación, pocas veces lo hemos visto utilizar.

Concluimos este epígrafe subrayando que un ejemplo de buena práctica geotécnica es conseguir datos incluso de dónde no parezca en principio que puedan obtenerse. La adquisición de información de interés geotécnico no tiene que acotar sus límites. Por ejemplo, en sismicidad histórica sabemos que una fuente de datos son los registros municipales. Y los libros parroquiales: en situaciones de catástrofe, aumentan los ingresos por entierros... y por donativos para rogativas.

Al hilo de esas fuentes informativas, no debe pasarse por alto los datos de interés que puede aportar, a su manera, el paisano que nos encontramos durante nuestras caminatas por el campo.

En un plano más cotidiano, es conveniente, por ejemplo, exigir en los pliegos de ejecución de sondeos geotécnicos que se incluya, en las partes del sondista, la profundidad del agua, medida al comenzar y al finalizar cada jornada de trabajo.

Nos referiremos como ejemplo de su importancia a la compañía de sondeos acometida en un deslizamiento activo existente desde tiempo inmemorial en la población de Benamejé, en una ladera socavada por el río Genil. Durante los trabajos de reconocimiento, observamos que los estadillos del sondista recogían, a unas determinadas profundidades, un ascenso de los niveles de agua en la mañana respecto a los medidos al concluir la jornada de trabajo. Esto es algo inusual, ya que el agua de perforación eleva artificialmente el nivel en el taladro, que en general durante las horas de inactividad se estabiliza con la del agua en el terreno. Esta paradoja, junto a otros datos, alertó de la presencia en la ladera de un acuífero confinado, en carga, que al ser cortado ascendía por el taladro. Este comportamiento fue determinante para la correcta definición del modelo hidrogeológico. Una inadecuada interpretación en el pasado había hecho fracasar una pretendida estabilización de la ladera basada en pozos interceptores de flujos en la coronación del talud. Los pozos drenantes quedaron cortos, ya que la profundidad del agua considerada sólo era real en los taladros, siendo la del terreno más profunda.

## 6. PAUTAS PARA LOS RECONOCIMIENTOS GEOLÓGICO-GOTÉCNICOS

Documentarse, ya se ha señalado, es el primer paso a dar en el camino de la investigación geotécnica. El siguiente paso consiste en elaborar una cartografía básica, que puede ser realizada a partir de mapas ya existentes y de recorridos de campo. Disponer de fotografía aérea a una escala conveniente facilita los reconocimientos, sobre todo en una investigación de cierta entidad. El GPS ha resuelto problemas de geolocalización que no hace mucho tiempo ralentizaba y hacía menos precisa la toma de datos en el terreno.

Los planos básicos y los perfiles preliminares se irán corrigiendo y completando en el transcurso de los trabajos de campo, de manera que al final de los mismos debe elaborarse una cartografía geológico-geotécnica (litogeotécnica) que refleje la realidad geológica.

Es incuestionable considerar que, cuanto mayor sea el número y detalle de los documentos existentes sobre la zona de estudio, más se facilitarán los trabajos previos a los reconocimientos, mejor se planificarán éstos y con más fiabilidad se podrán interpretar y extrapolar los datos obtenidos con ellos.

Los datos geológicos de campo se representan en planos mediante símbolos. Aunque no existe una simbología unificada, el consenso sobre su significado es amplio en la mayor parte de los casos. De cualquier modo, los mapas disponen de una leyenda que recoge el significado de los símbolos empleados.

En los mapas geológicos, las litologías se representan con tramas y la edad geológica con colores. Los accidentes tectónicos (fallas) y los elementos estructurales (direcciones y buzamientos) se simbolizan con trazos. Los elementos geomorfológicos se recogen de una forma muy general en los mapas geológicos convencionales. Sin embargo, son objetivo específico de los mapas geomorfológicos, en los que, a su vez, los componentes litológicos y estructurales se presentan de un modo simplificado.

La escala de trabajo geológico está condicionada por la necesidad de disponer de datos no superficiales para mejorar la fiabilidad de las interpretaciones deducidas de los reconocimientos sobre el terreno. De aquí que los cortes geológicos no puedan considerarse perfiles acotados.

Por el contrario, los perfiles litogeotécnicos son alzados del terreno en los que la proyección de los datos litológicos y estructurales obtenidos en superficie se contrasta y apoya con los datos procedentes de reconocimientos puntuales (sondeos mecánicos y catas) e integradores (perfiles geofísicos). Se trata, por tanto, de cortes acotados del terreno elaborados a una escala en que resulten representables aquellos elementos que deban serlo en función de su repercusión geotécnica. Con frecuencia puede ser necesario, para que la representación sea factible, ampliar la escala vertical de los perfiles respecto a la horizontal.

La necesidad de adecuar la investigación geotécnica a la realidad geológica, determina que los reconocimientos del terreno hayan de ser suficientemente detallados y exigentes. Esta prospección ha de ser precisa en aspectos tales como la litología y estructura de los materiales, meticulosa en el análisis de la hidrología subterránea y resolutiva en la definición de la geomorfología de la zona de estudio.

Es evidente que el tipo de investigación del terreno que se requiere para acometer un proyecto es función de la clase y entidad de la obra prevista, que asimismo canaliza el objetivo concreto de los reconocimientos, teniendo en cuenta que éstos deben aportar los datos necesarios para acometer con rigor la obra propuesta.

Como ya se ha apuntado, los trabajos de reconocimiento geológico de superficie han de ser completados y contrastados mediante una prospección en profundidad, a partir, como instrumento básico, de perforaciones. Estos taladros permiten establecer la columna litoestructural del terreno, tomar muestras y realizar ensayos. Las calicatas (ocasionalmente pozos y galerías) y la prospección geofísica son métodos complementarios de los reconocimientos mediante sondeos mecánicos.

En su caso (estudios para carreteras y presas), además de los reconocimientos directos del terreno, puede ser necesario acometer una investigación complementaria para localizar préstamos y/o canteras para áridos. Por otra parte, en estudios sismo-tectónicos que lo requieran es preciso ampliar la zona de trabajo.

Los resultados de la investigación geológica mediante sondeos mecánicos se presentan en estadillos, lo que permite una mejor visualización y comparación de los datos obtenidos. Los estadillos recogen los parámetros de la perforación (diámetro, sonda utilizada, revestimientos, incidencias habidas, etc.) y las características de los materiales encontrados (litología, estructura, estado de las discontinuidades, RQD, recuperación obtenida). Se incorporan también a los estadillos las profundidades a que se han tomado muestras (alteradas o inalteradas) y, en su caso, los valores de golpeo dados por pruebas de SPT o los resultados de ensayos de permeabilidad. La profundidad del nivel piezométrico se establece una vez concluido el sondeo. El taladro, si no se instrumenta con algún propósito específico, suele equiparse con tubería ranurada para seguir la evolución de un posible nivel de agua.

Las calicatas permiten únicamente comprobar las características de la franja más superficial del terreno (normalmente unos 3 m), cuando éste puede ser excavado. Se trata de un procedimiento de investigación rápido y de escaso coste, que puede ser muy útil. Siempre recomendamos que la excavación se cierre después de obtener los datos y que se anote la profundidad de las muestras. Un croquis puede ser incluso más clarificador que una fotografía.

El cuerpo de las técnicas aplicadas para los reconocimientos integradores son las prospecciones geofísicas. Es especial, por ser las más utilizadas, los extendimientos sísmicos y la eléctricos.

Para la caracterización geotécnica de los materiales es necesario tomar muestras. Como es sabido, los ensayos de estado requieren muestras inalteradas. Se obtienen en sondeos mediante tomamuestras adecuados (parafinado o encintando los testigos cuando este procedimiento permita preservarlos). En las calicatas se obtienen muestras alteradas (tallar muestras en bloque no es una práctica usual).

La articulación de los trabajos geotécnicos es siempre complicada, en mayor medida cuanto más complejo sea el terreno y de mayor entidad la obra. Es por ello que, como premisa fundamental, la planificación de los reconocimientos ha de ser flexible, para permitir hacer frente a situaciones no previstas. En este sentido, es una

buena práctica considerar un número suplementario de sondeos, metros de perforación, muestras, ensayos, etc., de reserva.

En obras lineales, se debe contar al menos con un sondeo por unidad geológica y, además, con un sondeo en la coronación de los desmontes significativos, en el apoyo de grandes terraplenes o cuando se ubiquen sobre suelos blandos, en los estribos y apoyos de viaductos y en los emboquilles e interior de túneles. La investigación de recubrimientos poco profundos, que hayan de ser soporte de explanada, así como el apoyo de tubos de paso y pequeñas obras de fábrica, puede hacerse con calicatas. La prospección sísmica es útil para valorar el espesor de la franja de alteración y la ripabilidad de los materiales, mientras que para la investigación de anomalías asociables a huecos en el terreno se suele optar por la prospección eléctrica, o, en ocasiones (ante la sospecha de huecos subsuperficiales), por el geo-radar.

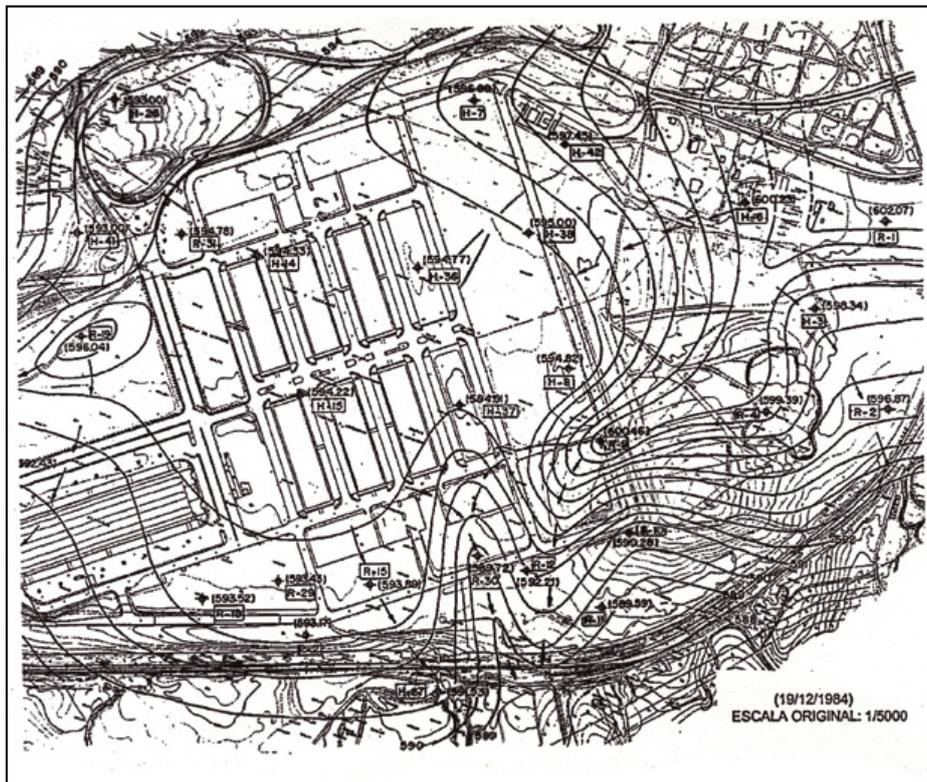
En obras hidráulicas, el papel del agua subterránea adquiere especial protagonismo. Obviamente, en la investigación de cerradas de embalse no sólo debe valorarse la resistencia de los materiales, sino también la incidencia del agua sobre la presa y su cimiento. La estanqueidad necesaria para que el embalse sea funcional puede requerir construir pantallas impermeabilizantes, para lo cual se requiere realizar una investigación hidrogeológica minuciosa. Por otra parte, pozos y galerías son procedimientos de reconocimiento geotécnico que pocas veces se utilizan fuera del dominio de las cerradas de embalse.

En el ámbito de la construcción de viviendas, la implementación de reconocimientos geotécnicos la establece el código de la edificación vigente. En todo caso, la demanda de estudios geotécnicos está vinculada a las características de la construcción (planta, altura, sótanos) y a la experiencia de construir en terrenos similares. En este contexto, además de sondeos mecánicos como herramienta básica de investigación, pueden ser muy útiles los penetrómetros.

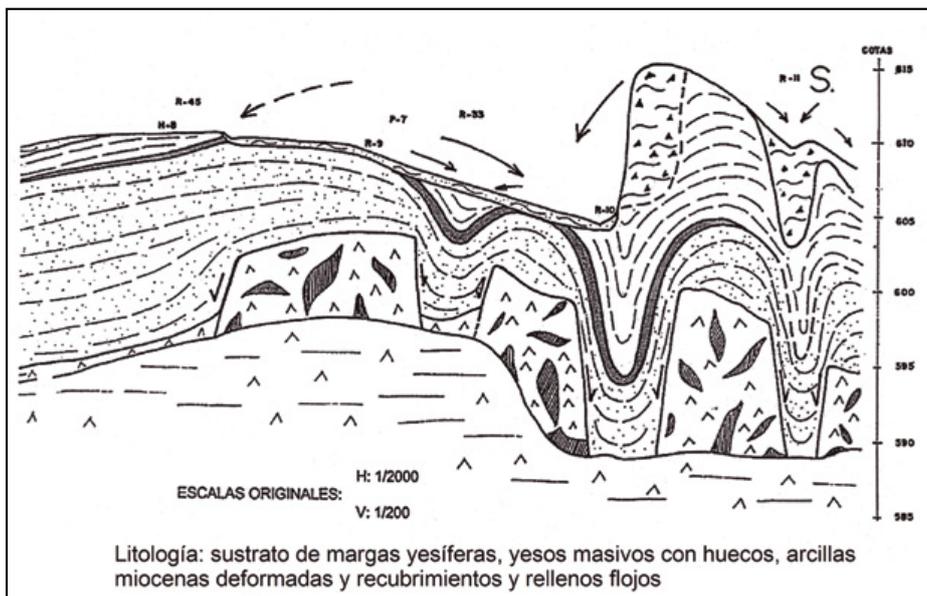
Por la sensibilidad social hacia el término “contaminación”, la geotecnia medioambiental es hoy una disciplina de importancia singular. La gestión de vertederos parte de un estudio minucioso del emplazamiento, que es necesario valorar mediante una rigurosa planificación de los reconocimientos de campo. Esta investigación es necesaria para cumplir las exigencias de una exigente normativa, que tiene en cuenta el tipo de vertido y la estanqueidad del emplazamiento. Por otra parte, una reciente fuente de actividad geotécnica es el reciclado de residuos industriales y materiales similares.

Dentro del conjunto de reconocimientos de campo descritos, los centrados en la valoración de los macizos rocosos tienen una singularidad que los diferencia de los empleados en investigaciones geotécnicas en suelos. Adquiere aquí una importancia especial la evaluación de parámetros estructurales, que como ya se ha indicado, han de ser tomados en superficie (estaciones geomecánicas) y extrapolados a la profundidad requerida con el apoyo de sondeos.

Los datos aportados de forma parcial por cada uno de los medios implicados en la investigación de campo se complementan. En ningún caso han de ser contradictorios, sino que deben validarse entre sí. Este último aspecto es importante, por cuanto cruzando datos pueden dilucidarse



**Figura 5.** Mapa de isopiezas del solar de la Unidad Alimentaria de Mercamadrid, distorsionadas como consecuencia de las perturbaciones kársticas del subsuelo.



**Figura 6.** Interpretación de las perturbaciones kársticas que originan una parte de las singularidades hidrogeológicas que se visualizan en la figura anterior.

aspectos que no se revelan a través de un único tipo de investigación. Asimismo, permiten verificar o desechar hipótesis de trabajo.

Como ejemplo ilustrativo del planteamiento descrito recogemos, por la trascendencia del estudio, un trabajo en el que se planteó un reconocimiento del terreno tomando en consideración dos investigaciones relacionadas, pero autónomas en sus planteamientos: una investigación hidrogeológica (que incluyó análisis químicos e isotópicos) contrastada con una campaña de reconocimiento más específicamente geotécnica (realizada mediante sondeos

mecánicos, calicatas y tomografías eléctricas). El modelo geológico fue determinante para dilucidar las condiciones de cimentación de los edificios y naves de la Unidad Alimentaria de Mercamadrid, en un entorno afectado por actividad kárstica (figuras 5 y 6).

En este caso, además, la parcela había sufrido las consecuencias de una importante acción antrópica (explotación de yesos, extracción y acarreo de materiales diversos, acumulación de escombros y vertidos de basura). Estas alteraciones morfológicas son siempre un problema para delimitar y caracterizar geotécnicamente. Desde luego, un

problema más acentuado que las perturbaciones naturales, que son consecuencia de pautas más predecibles.

## 7. PRÁCTICAS DE CAMPO Y TALLERES GEOTÉCNICOS

La vida profesional del geotécnico no puede perder de vista los trabajos de campo. Por consiguiente, las visitas a obra y la toma de datos sobre el terreno forman parte del cuerpo del aprendizaje. Es seguramente en estos ámbitos donde se produce una más estrecha interrelación entre el enseñante y el alumnado, dado que se da una toma de contacto con la realidad, fuera de las conjeturas del aula.

En la obra, la enseñanza deja de ser un objeto virtual para forjarse con una realidad concreta; lo teórico se somete a la praxis y las fórmulas alternativas (los planes “B”, podría decirse) se hacen tangibles. Las obras requieren no pocas veces soluciones puntuales no previstas, tanto en fase de proyecto como de construcción. Estas soluciones, que han de ser tomadas sobre la marcha, aportan un buen caudal de conocimientos prácticos a los neófitos.

Una de las herramientas que se han postulado como más eficaces para el aprendizaje geotécnico son los talleres. Con ellos no se busca sólo hacer frente a problemas geotécnicos, sino, tal y como en su momento nosotros los planteamos, se trata de desarrollar un trabajo en equipo y de ejercitarse en estructurar y presentar los proyectos de forma adecuada.

Es decir, entendimos que una práctica de taller debía ser acometida y resuelta de forma exigente, articulada y convenientemente justificada en las soluciones adoptadas. La claridad de ideas, y de propuestas, debía traslucirse ya en la presentación.

Acometer los trabajos en equipo— de 3 o 4 alumnos— requería un reparto de tareas y justificaba una interacción que facilitaba el aprendizaje a alumnos con menor bagaje técnico. La fórmula, en los años que la mantuvimos, resultó ser muy satisfactoria.

Una enquistada tendencia que pusieron de manifiesto los talleres fue que, con frecuencia, las memorias de los trabajos no se ajustaban estrictamente a las cuestiones pedidas, en el sentido de aportar una innecesaria información complementaria (por ejemplo, detallar las características genéricas que deben tener las muestras inalteradas o los sondeos propuestos). Probablemente era un modo de rellenar carencias en la resolución de algunas cuestiones o de mostrar que se estaba en condiciones de ampliar las respuestas. En cualquiera de los dos supuestos, el resultado nos parecía malo, ya que lo que primero percibíamos era que no se había comprendido bien lo que se pedía.

Los ejercicios mejor resueltos, en porcentaje de respuestas correctas, o al menos geotécnicamente sensatas, abundaban en gráficos y figuras ilustrativas. La moraleja, en este sentido, es evidente: un proyecto redactado con torpeza, aunque correctamente resuelto en sus aspectos técnicos, estaría minusvalorado en su apreciación.

No resulta difícil imaginar a un examinador que debe evaluar varias propuestas. Un proyecto farragoso, con parco contenido visual, puede traslucir una falta de esa claridad de ideas que el licitador exigirá al adjudicatario en el momento de acometer los trabajos inherentes a la obra licitada.

Un texto hábilmente redactado aguanta toda la gama de grises. No así las figuras, que visualizan, en blancos y negros, de un solo golpe de vista, muchas páginas de información. “Muéstrenme gráficos” pedía el profesor Terzaghi cuando se le puso delante una nutrida lista que daba cuenta del tipo y número de ensayos realizados en el CEDEX (la cita puede ser apócrifa, pero no por ello es menos reveladora de la claridad de ideas de uno de los padres de la geotecnia).

Nuestro taller geotécnico finalizaba con un debate acerca de las soluciones aportadas por cada equipo, que se contrastaban con las facilitadas por el tutor. Esta dinámica, además dar la palabra a las propuestas de los alumnos, permitía incorporar nuevas ideas a los talleres del siguiente curso.

## 8. CONCLUSIONES

En nuestra opinión, el aprendizaje de la geología geotécnica tiene no poco de trabajo artesano, que se va perfeccionando con el día a día. Estamos refiriéndonos al marco conceptual, no sólo a la mecánica de los ensayos. De aquí que la enseñanza de esa disciplina conlleve una transmisión de experiencias sólo posible en clases presenciales.

Hay que facilitar una contextualización de lo que se enseña, transmitiendo criterios y pautas de actuación, antes que meras fórmulas concretas. No nos cansamos de repetirlo.

Aunque con los años puede llegar el momento en que no aprendamos mucho más de lo que ya sabemos, sí deberemos ser capaces de utilizar mejor las herramientas de que dispongamos, y de minimizar las consecuencias de nuestros posibles errores.

Es necesario ayudar, ya desde el aula, a fijar objetivos, pero corresponde a cada cual, en el ejercicio de su profesión, y dentro de las inevitables limitaciones de tiempo y presupuesto, andar el camino (o hacer camino al andar, como quería el poeta Antonio Machado) para alcanzarlo.

## 9. REFERENCIAS

- Brezinski, C. (1993). *El oficio de investigador*. Madrid: Siglo XXI de España.
- Prigogine, I. (1983). *¿Tan sólo una ilusión?: Una exploración del caos al orden*. Barcelona: Tusquets.
- Ramón y Cajal, S. (1998). *Los tónicos de la voluntad*. Madrid: Espasa-Calpe Austral.
- Salinas, J. L. (2004). *Diccionario Guía de Reconocimientos Geológicos para Ingeniería Civil*. Monografía, M-79, Madrid: Servicio Editorial CEDEX.