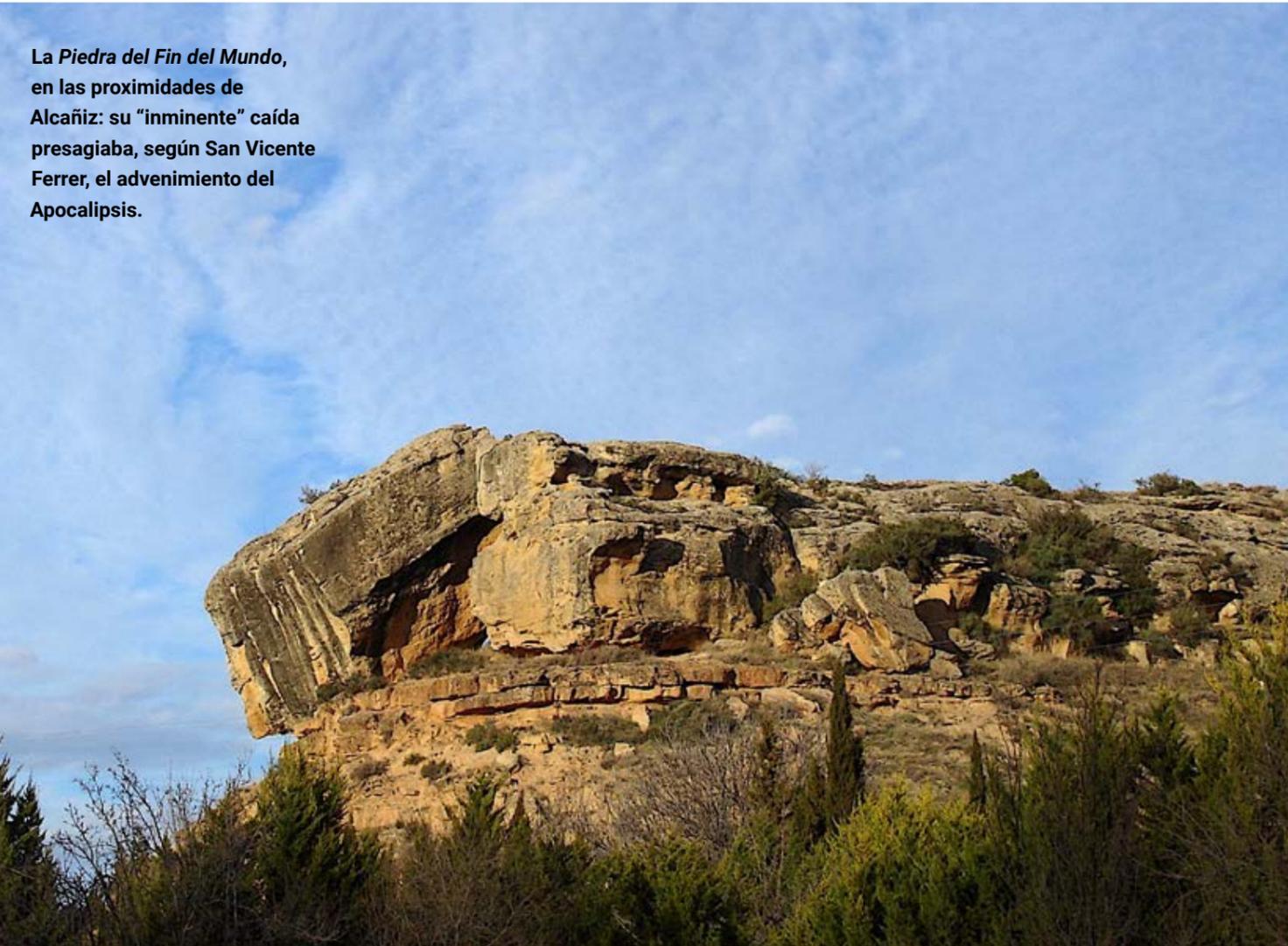


Geología y desastres naturales: el espacio preciso, el tiempo profundo



“El conocimiento geológico resulta imprescindible para acercarnos a comprender la dinámica y el *tempo* real de nuestro planeta.”

José Luis Simón



La *Piedra del Fin del Mundo*, en las proximidades de Alcañiz: su “inminente” caída presagiaba, según San Vicente Ferrer, el advenimiento del Apocalipsis.

A comienzos del siglo XV había en nuestro país un gran *influencer*: el dominico San Vicente Ferrer. Su fama de predicador persuasivo e incansable le precedía en sus largas campañas pastorales por toda la Corona de Aragón y por media Europa. En su paso por Alcañiz, se cuenta que pronunció un exaltado sermón en la loma en que se asienta la ermita de la Encarnación, y en cuya cornisa se halla un enorme bloque de roca en precario equilibrio. El clérigo consiguió encoger el alma de sus fervientes *followers* anunciando la proximidad del Juicio Final, y comparándola con el poco tiempo que, a todas luces, faltaba para que esa piedra cayese por la ladera. Puesto que el Apocalipsis podía ocurrir en cualquier momento, había que prepararse para lo inminente*.

“Pensamiento mágico” llamaríamos ahora a esa retórica y, si quisiéramos alimentar más nuestro escepticismo, bastaría con resaltar que la *Piedra del Fin del Mundo* sigue más o menos en el mismo sitio seis siglos después. También era pensamiento mágico la “leyenda urbana” que en el Teruel de los años 60 del XX nos relataba nuestro maestro de Primaria: una profecía según la cual Teruel sería algún día destruido por una erupción volcánica. La imaginación infantil se trasladaba entonces al vecino cerro de Santa Bárbara, caracterizado por su perfil cónico, y de cuya cúspide casi nos parecía ver salir humo.

Aun siendo partícipes estas leyendas de la misma irracionalidad, hay entre ambos escenarios una sustancial diferencia: en Teruel no hay volcán alguno ni se le espera (el cerro de Santa Bárbara es un simple producto de la erosión de rocas sedimentarias), mientras que en Alcañiz sí hay un enorme bloque de piedra que algún día caerá de la montaña. Si la racionalidad y la ciencia deben sustituir al pensamiento mágico, habrá que ahondar en esa obviedad y articular mecanismos de análisis riguroso del peligro que tales fenómenos comportan. Asimismo, será necesario trasladar ese planteamiento a la mente y a la cultura de la ciudadanía y, aun más importante, a la mente y a la cultura de quienes nos administran y toman las decisiones que nos afectan.

ESTRATEGIAS FRENTE A LOS RIESGOS NATURALES: LA CATÁSTROFE DEL CAMPING DE BIESCAS

El riesgo que se deriva de un fenómeno catastrófico es el producto de cuatro factores: (1) peligro o probabilidad de que el fenómeno ocurra, (2) exposición al mismo (en el espacio y en el tiempo), (3) valor de todo aquello que queda expuesto (personas, infraestructuras, bienes materiales...) y (4) vulnerabilidad de los mismos.

Imaginemos la siguiente escena. Una persona que camina por la ciudad decide atravesar una zona ajardinada. Ve los aspersores de riego funcionando y elucubra cómo hacer para evitar mojarse:

- Puede hacer cálculos probabilísticos sobre cuándo y cómo atravesar la zona regada, basados en la velocidad del giro de los aspersores y en su propia capacidad atlética para esquivarlos.
- Puede ir a buscar un impermeable con el que proteger el apreciado traje que lleva puesto.
- Puede ir a cambiar el traje por su chándal de estar por casa. Poco se perderá si se le moja.

“Si la racionalidad y la ciencia deben sustituir al pensamiento mágico, habrá que ahondar en esa obviedad y articular mecanismos de análisis riguroso del peligro.”

* Este artículo constituye una transcripción libre de la lección inaugural pronunciada por el autor en el acto de celebración de la festividad de San Alberto Magno (Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza, 13 de noviembre de 2023).

- Pero lo más probable es que decida aplicar el sentido común: dar un pequeño rodeo y evitar la zona que cubren los aspersores.

De las distintas estrategias posibles (esquivar el peligro, reducir la vulnerabilidad o el valor de sus bienes, evitar la exposición espacial) elige esta última.

Es precisamente lo que no se hizo en el camping Las Nieves de Biescas. Allí, el riesgo de una catástrofe que en 1996 se llevó 87 vidas humanas no había sido adecuadamente valorado. La estrategia para su prevención había sido tratar de disminuir la vulnerabilidad mediante una obra de ingeniería civil: un canal artificial que supuestamente habría de encauzar cualquier riada que se

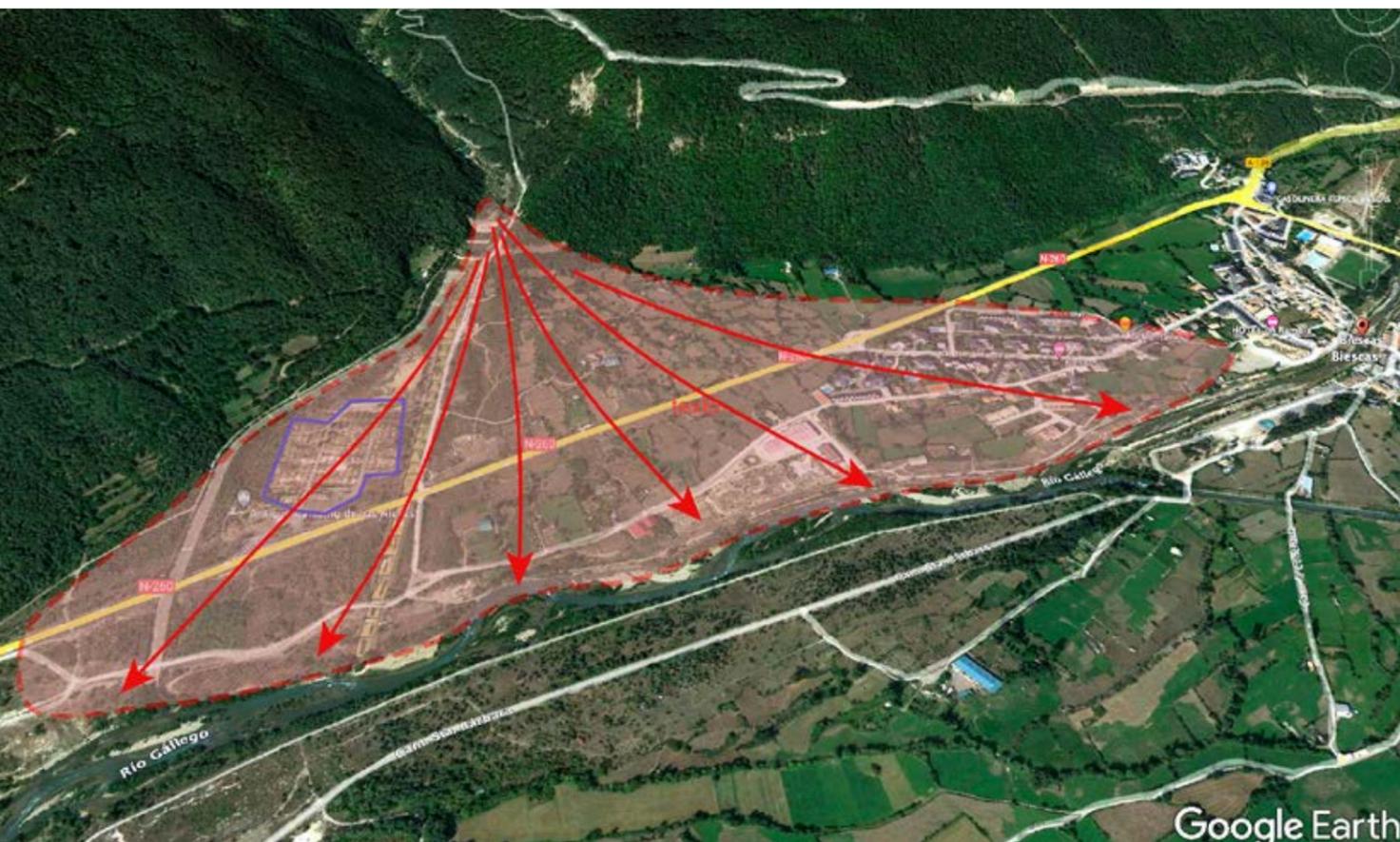
produjese en el barranco, y unas cuarenta presas aguas arriba que debían retener los sedimentos. Es el tipo de estrategia que se elige cuando, por encima de todo, se confía en la tecnología. Pero en ese caso no funcionó: la avenida desbordó ampliamente el cauce artificial, y las presas fueron cayendo como fichas de dominó contribuyendo a agravar aun más la avalancha de rocas y barro que arrasó el camping.

Otra estrategia, más sencilla y sensata, hubiese sido evitar la exposición al peligro. Era la que emanaba del sentido común, y también del conocimiento científico, como bien habían señalado el investigador del Instituto Pirenaico de Ecología Pedro Montserrat y los funcionarios Emilio Pérez Bujarrabal y Francisco Ayala, que redactaron informes negativos sobre la ubicación de aquella infraestructura turística.

La imagen de satélite de Google Earth muestra el aspecto del gran cono de deyección del barranco de Arás (Biescas, Huesca), donde se instaló el camping Las Nieves.

Para evitar la exposición espacial, la geología posee métodos eficaces que permiten interpretar el registro dejado por esos fenómenos catastróficos en el pasado y, por tanto, acotar el espacio que puede verse afectado en el presente. Ese registro, en forma de sedimentos, rocas, fósiles, estructuras tectónicas o formas del relieve constituyen la *memoria de la Tierra*. Una memoria que va mucho más allá de la breve experiencia y la frágil memoria humana.

El camping de Biescas se situaba en el interior de un gran cono de deyección o, según la denominación habitual en geología, de un abanico aluvial. El barranco de Arás desagua en él y, al perder súbitamente su energía por el desconfinamiento y la disminución brusca de pendiente, descarga los sólidos que arrastra. El día 7 de agosto de 1996 desaguó hasta 500m³/s en el ápice del abanico y arrastró bloques de hasta 10 toneladas. En total, se estima que en esa sola avenida movilizó y depositó en el cono de deyección más de 100.000 toneladas de sedimentos. El barranco ha ido así construyendo, durante milenios, un edificio sedimentario fácilmente reconocible en el relieve. Ese es el registro geológico de una catástrofe que se repite de tiempo en tiempo, que puede "leerse" en el paisaje. Cualquier discurso que se empeñe en negar esa evidencia carece de racionalidad.



▲
Los hundimientos kársticos en el entorno de Zaragoza son un fenómeno registrado en el pasado geológico en forma de *paleodolinas* (arriba), y visible en la actualidad por sus efectos en infraestructuras y edificaciones (abajo).

OTRO CASO: LAS DOLINAS DE ZARAGOZA

Un fenómeno bien conocido en el entorno de Zaragoza y en otras zonas de Aragón son las dolinas o simas, producidas por el hundimiento del terreno sobre huecos originados por disolución del yeso en el subsuelo. El fenómeno se manifiesta en el registro geológico en forma de *paleodolinas*, concavidades rellenas de sedimentos o de material colapsado cuyas secciones vemos en muchos taludes naturales y artificiales, y continúa activo en la actualidad. Desde la gran expansión urbana de Zaragoza en las décadas de 1960 y 1970, esas dolinas fueron cubiertas de escombros para construir sobre ellas. La subsidencia del terreno continuó, ya que no hay medidas eficaces para evitarlo, y los daños que han producido en zonas residenciales e industriales desde entonces son cuantiosos.

Las zonas de subsidencia son, en general, conocidas. Hay evidencias en superficie, así como técnicas de auscultación del subsuelo mediante prospección geofísica

(eléctrica, electromagnética, microgravimétrica, georradar), que las delatan. Por tanto, es factible evitar la exposición de edificaciones e infraestructuras a su impacto. Los geólogos de la Universidad de Zaragoza venimos insistiendo en ello desde hace mucho tiempo, alertando de la inconveniencia de algunos planes urbanísticos o, allá por 2003, en un episodio que tuvo un gran impacto informativo, del discutible trazado del corredor de entrada del AVE a la capital aragonesa.

En algunas ocasiones el conocimiento científico ha sido tenido en cuenta. Así, el Ayuntamiento de Zaragoza encomendó en 1998, a un equipo de investigadores, la elaboración de mapas de peligrosidad de subsidencia del terreno por dolinas activas en algunas áreas que el nuevo Plan General de Ordenación Urbana declaraba urbanizables. Se trataba de evitar la edificación sobre las zonas peligrosas, fijando unas pautas que, en general, han sido asumidas desde entonces por los geólogos consultores, los arquitectos y las empresas constructoras.

En otros casos, en zonas urbanas ya consolidadas, muchas dolinas inútilmente ocultadas han continuado manifestando su actividad y produciendo daños, pero las servidumbres económicas y administrativas han impedido ordenar adecuadamente la edificación. Es el caso de una dolina situada en el barrio de Valdefierro, sobre la que se construyó la factoría de la empresa Hispano-Carrocería. Sus naves fueron parcialmente dañadas en los años 80 y 90, antes de ser demolidas. Más tarde se edificó allí un hipermercado y un polígono de viviendas, uno de cuyos bloques fue desalojado años más tarde ante el riesgo que suponía su basculamiento visible hacia el centro de la sima.

LA VARIABLE TIEMPO

Hemos señalado el papel de la geología para prevenir la exposición espacial a algunos desastres naturales, basado en su capacidad de leer la *memoria de la Tierra* y acotar el espacio preciso en que pueden ocurrir esos fenómenos. Pero es momento de hablar también de la variable tiempo. Es inexorable que la *Piedra del Fin del Mundo*, como otras rocas en equilibrio crítico en las laderas, un día acabará cayendo. Pero la pregunta es: ¿cuándo?

Hay fenómenos a los que la exposición espacial, aun conocida y acotada, puede ser inevitable. Ahí están, por ejemplo, las ciudades construidas en las faldas de volcanes o a orillas de los ríos. Hay otros, como los tifones o los terremotos, cuyos efectos se extienden por territorios tan amplios que es virtualmente imposible escapar de ellos en caso de que se produzcan. En tales casos, la cuestión crítica no es el “dónde” sino el “cuándo”.

En algunos casos esa pregunta tiene respuesta. Es decir, hay fenómenos que tienen una predictibilidad razonable, que permitiría evitar la exposición temporal de la población y de los bienes materiales muebles mediante su evacuación a tiempo. Los sistemas de alerta temprana de inundaciones o de erupciones volcánicas, cada vez más avanzados, son una muestra de cómo se ha progresado en esa línea.

Pero hay otros que no son predecibles, y es entonces cuando nuestra mente se resiste a aprehenderlos y gestionarlos. En particular, le resulta difícil asumir escenarios intermedios entre las catástrofes que preocupan porque “seguro ocurrirán” (generalmente, aquéllas de las que se ha tenido experiencia directa o cercana en el pasado) y esas otras que nos son indiferentes porque “es imposible que ocurran” (generalmente, las que han

sucedido más de una generación atrás). Se ignora que lo que hay, en realidad, son fenómenos con alta probabilidad y fenómenos con baja probabilidad. Se piensa que si una catástrofe ocurre “una vez cada mil años” no merece ser tenida en cuenta. Esa postura lleva a flagrantes sinsentidos: riadas similares en el barranco de Arás no suceden “cada 1000 años” como publicó la prensa, ni mucho menos cada 5000, como se llegó a decir en el largo proceso judicial que siguió el caso de Biescas. En realidad, en 1913 y 1929 habían ocurrido sucesos similares, uno de ellos con una víctima mortal.

TERREMOTOS: LA PERSPECTIVA GEOLÓGICA

Hemos visto cómo hay peligros naturales que pueden acotarse en el espacio y otros que no. Hay desastres predecibles en alguna medida y otros que no lo son. En ese variado panorama, la peor parte se la llevan los terremotos: son impredecibles y sus efectos se extienden por territorios inabarcables.

En tal situación, a la ciencia sólo le cabe hacer una aproximación probabilística, en el espacio y en el tiempo. Por ejemplo, elaborando mapas de peligrosidad en forma de máxima intensidad o máxima aceleración sísmica esperable en cada punto de un territorio en un periodo de retorno determinado. Con ello tratamos de conocer mejor los parámetros del peligro para que, aunque este sea inevitable, sí podamos gestionar el riesgo de una forma racional e integral.

Para ello tenemos dos estrategias que se complementan entre sí:

1. Minimizar la exposición espacial, o al menos tratar de ajustar el valor personal, económico o estratégico de los bienes a la probabilidad del peligro.

Trabajos de paleosismología llevados a cabo por investigadores del Dpto. de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza en la falla de Conclud, cerca de Teruel.



“Se piensa que si una catástrofe ocurre una vez cada mil años no merece ser tenida en cuenta.”

Las administraciones públicas cuentan para ello con las herramientas de ordenación del territorio.

2. Reducir la vulnerabilidad de las edificaciones (y, por tanto, de las personas que las habitan) implementando normas de construcción sismorresistente allí donde la peligrosidad sea más alta.

Normas constructivas y ordenación del territorio son las únicas dos herramientas eficaces que tenemos, hoy por hoy, para hacer frente a los terremotos.

Y es en esa aproximación probabilística donde de nuevo entra en juego la geología, y lo hace aportando una visión del *tempo* de los fenómenos naturales que es mucho más realista que la que nos proporciona nuestra corta experiencia. Frente a la breve memoria humana (personal y familiar, en incluso la breve memoria histórica y documental de una civilización), la geología proporciona el conocimiento del tiempo profundo, de la *memoria de la Tierra*.

La inmensa mayoría de los terremotos están producidos por fallas tectónicas. Los terremotos sucedieron, pero las fallas siguen ahí. En las rocas de su entorno y en los rasgos del relieve ha quedado el registro físico de grandes terremotos prehistóricos. Su estudio constituye una disciplina, la Paleosismología, en la que convergen métodos de la Geología Estructural, la Geomorfología, la Sedimentología, la Geofísica y la Geocronología.

Si las fallas no afloran en el terreno, los paleosismólogos las buscan excavando trincheras *ad hoc*, que luego estudian con detalle de arqueólogos. El objetivo es identificar y datar pulsos de movimiento que puedan corresponder a paleoterremotos, analizando las relaciones entre los desplazamientos de las fallas y los sedimentos contiguos. Las dataciones suelen hacerse mediante técnicas como el Carbono 14, aplicable a restos de materia orgánica de hasta unos 40 ka (40.000 años), o la Luminiscencia Ópticamente Estimulada (OSL), que se extiende hasta unos pocos cientos de miles de años.

Los estudios de este tipo en Aragón empezaron hace relativamente poco tiempo, a finales de la década de 2000. Fueron especialmente intensos en la falla de Conclud (Teruel), una falla que nuestro grupo investigó en detalle y que proporcionó un registro de actividad excepcionalmente amplio. Los resultados nos permitieron: (i) reconstruir la historia de sus movimientos en los últimos 70 ka; (ii) valorar en 6,6-6,8 la magnitud del terremoto que podría producir si se moviese toda ella (>14 km de longitud);

- (iii) calcular el periodo de recurrencia medio de los grandes seísmos (en torno a 7000 años) y la edad del último pulso registrado (aproximadamente entre 13 ka y 3 ka);
- (iv) estimar la probabilidad de que ese seísmo potencial máximo ocurriese en el próximo siglo (0,5 - 5 %).

EL RIESGO SÍSMICO DEL NUEVO HOSPITAL DE TERUEL

Traer a colación los resultados de esas investigaciones sirve para enmarcar un último caso que ejemplifica bien la perspectiva geológica con la que debe abordarse la gestión del riesgo sísmico. Se trata del proyecto del nuevo hospital público de Teruel, que fue objeto de un intenso debate científico, técnico y político cuando se dio a conocer allá por 2013.

Para construir ese hospital se eligió un terreno en la zona de replevo entre las fallas de Conclud y Teruel, ambas con actividad demostrada durante el Cuaternario. El registro paleosismológico, que teníamos ya de la primera falla, y los indicios preliminares en la segunda nos parecieron argumentos suficientes para que esas fallas se considerasen potenciales fuentes sísmicas, y fuesen tenidas en cuenta en la valoración de peligrosidad del emplazamiento. En consecuencia, enviamos un mensaje de alerta a la administración autonómica, concretamente al SALUD. Le sugerimos que en el proyecto del nuevo hospital se aplicase la vigente Norma de Construcción Sismorresistente Española de 2002 (NCSE-02), a pesar de que no había obligación legal para ello por considerarse "oficialmente" irrelevante el peligro sísmico en Teruel.

Nuestro equipo redactó un informe haciendo una estimación del terremoto esperable para un periodo de retorno de 500 años (el considerado a efectos de la NCSE-02): $M = 5,3$; aceleración sísmica $> 0,1 \text{ g}$ ($> 10\%$ de la aceleración de la gravedad). El SALUD solicitó otros dos informes, al Instituto Geográfico Nacional (IGN) y al Instituto Geológico y Minero de España (IGME), que corroboraron en líneas generales la conveniencia de aplicar la Norma Sismorresistente, lo que llevó a modificar el proyecto para que el edificio pueda resistir la aceleración sísmica calculada.

El debate político entre el Gobierno de Aragón y la oposición (en el que, sin quererlo, nos vimos envueltos los investigadores) sacó a relucir, tristemente, argumentos del más puro pensamiento mágico. Con una particularidad: pensamiento mágico es la ingenuidad de que "no va a pasar nada", como también lo es su



Ubicación del nuevo hospital público de Teruel, construido en las proximidades de la falla activa de Conclud.

antítesis, el fatalismo paralizante de que "todo va a pasar en cualquier momento". La intervención de algún parlamentario en las Cortes de Aragón tuvo la habilidad de combinar en una sola ambas posturas: todo un ejercicio de acrobacia política.

ASOMÁNDONOS AL TIEMPO PROFUNDO

La geóloga y escritora noruega Marcia Bjornerud, en su curioso ensayo *Timefulness*, escribe: *En nuestra civilización somos "analfabetos temporales". (...) El tiempo pasa como si fuese aboliendo el pasado. Creemos que nuestra innovación acelerada supone una ruptura epistémica tan radical que nada del pasado sobrevive. (...) El concepto de "tiempo profundo" es la mayor contribución de la Geología a la humanidad. Igual que el telescopio o el microscopio nos permiten acceder a las escalas espaciales que están fuera de nuestra percepción cotidiana, la Geología nos permite trascender la escala temporal de las experiencias humanas.*

Efectivamente, el conocimiento geológico aporta una perspectiva del tiempo que tal vez produce vértigo cuando la abordamos desde nuestra limitada memoria personal y social. Sin embargo, resulta imprescindible para acercarnos a comprender la dinámica y el *tempo* real de nuestro planeta. Como reza el subtítulo del libro de M. Bjornerud (perdone el lector si puede parecerle pretencioso) "*pensar como un geólogo puede ayudar a salvar el mundo*".

José Luis Simón
Dpto. Ciencias de la Tierra
Universidad de Zaragoza