

Terremotos de la antigüedad

La inspección geológica del subsuelo del lago de Lucerna saca a la superficie una secuencia de temblores prehistóricos

Michael Schnellmann, Flavio S. Anselmetti, Domenico Giardini, Judith A. McKenzie y Steven N. Ward

“El martes 18 de septiembre de 1601, poco antes de las dos de la madrugada, un intenso y aterrador temblor de tierra sacudió los alrededores de Lucerna... Nadie recordaba un acontecimiento parecido. Ni siquiera las crónicas de la ciudad se hacían eco de algo semejante en el pasado.” Así comienza el informe de Renward Cysat, secretario municipal de Lucerna. Testigo presencial de los hechos, anotó con todo detalle la catástrofe que siguió a uno de los terremotos más violentos sufridos en Europa central. El temblor causó considerables daños en gran parte de Suiza. Se sintió también en puntos de Francia, Alemania e Italia. Los sismólogos estiman que, de haberse registrado con instrumentos modernos, el episodio hubiera alcanzado un 6,2 en la escala de Richter.

Los temblores de tierra forman parte de la cotidianidad en ciertas regiones del mundo (Japón, California, etcétera). En Suiza, en cambio, a pesar de convivir con la amenaza de aludes e inundaciones, nadie piensa en la posibilidad de un terremoto. Sin embargo, los archivos históricos revelan que este país centroeuropeo sufrió en la antigüedad varios seísmos que causaron considerables daños materiales y la pérdida de vidas humanas. El episodio de Lucerna en 1601 constituye un ejemplo. Otro similar ocurrió en 1356, que arrasó gran parte de la ciudad de Basilea.

Este último se considera el de mayor fuerza desatada en Europa central. Si otro del mismo tenor sacudiese la Suiza actual, la mortandad y la pérdida de bienes materiales alcanzaría cifras de auténtica catástrofe. Resulta, no obstante, difícil cuantificar los recursos necesarios para hacer frente a tal amenaza, si no se conoce la magnitud ni la frecuencia de los futuros terremotos. Este es el motivo por el cual tratamos de estimar los riesgos sísmicos en Suiza. Tarea ésta que requiere, como mínimo, un buen conocimiento de los tiempos de recurrencia (lapsos entre dos

seísmos) de unos sucesos que allí son escasos aunque intensos.

Hasta hace muy poco, el catálogo de terremotos históricos se apoyaba en las mediciones sismográficas y en documentos escritos. En Suiza, el primer sismógrafo se instaló en 1911; el registro escrito abarca sólo el último milenio. Por tanto, las dos principales fuentes de información sísmica, si bien valiosas, resultan insuficientes para identificar los lugares que, en el pasado, sufrieron terremotos intensos en intervalos de pocos miles de años. Tales limitaciones constituyen un problema no pequeño, porque los tiempos de recurrencia dilatados son característicos de regiones que, como Suiza, se encuentran lejos de los bordes de placas tectónicas (donde se concentra la actividad sísmica).

La única forma de saber si antiguamente ocurrieron (y pueden volver a ocurrir) fuertes temblores de tierra en tales lugares es extender a tiempos prehistóricos el catálogo de sucesos conocidos. La información que necesitamos no se encuentra escrita, por tanto, sino que hemos de recuperarla del registro de lo acontecido en tales episodios impreso en la naturaleza. Nuestro trabajo comporta, pues, descubrir e interpretar los archivos geológicos para reconstruir la historia de los seísmos de un pasado lejano.

Los temblores sísmicos moderados o fuertes dejan huellas en el suelo o el subsuelo. En esos rastros se basan los paleosismólogos para abordar los terremotos prehistóricos. Cavan trincheras a través de la traza superficial de fallas activas, que les permiten determinar dónde y cuando ocurrieron los seísmos. Esta estrategia, sin embargo, no ofrece buenos resultados en zonas alejadas de los bordes de placas, donde las fracturas superficiales resultan escasas y difíciles de identificar. En dichas regiones interiores resulta más efectivo estudiar aquellos rasgos que registran el temblor del terremoto en un lugar concreto, independientemente



de la posición exacta de la falla que lo causó.

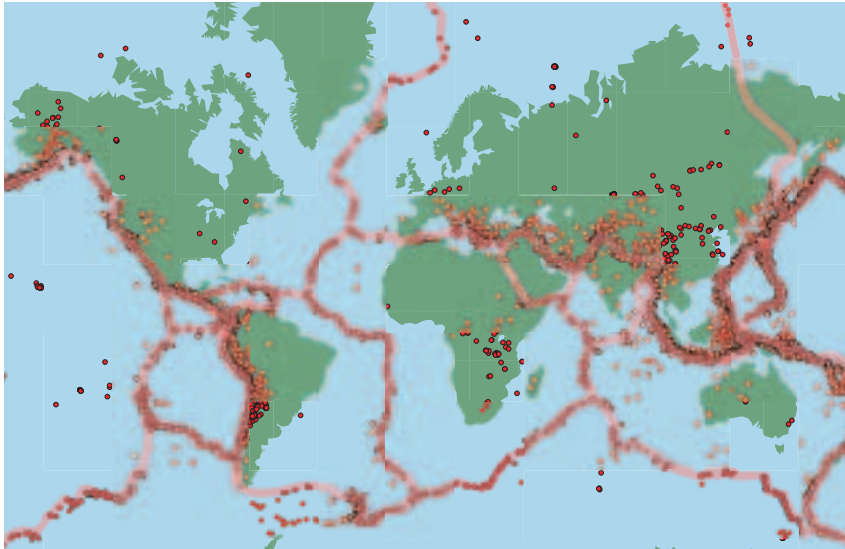
Para nuestra fortuna, un temblor de tierra conlleva numerosos efectos secundarios: las estalactitas se rompen, las rocas en equilibrio inestable caen, las pendientes escarpadas se tornan frágiles y los suelos arenosos fluyen licuescentes. Algunos de esos sucesos, sin embargo, ocurren también por otras razones: una estalactita, por ejemplo, puede romperse por la acción de su propio peso y un corrimiento de tierras puede deberse a una intensa lluvia. La labor del paleosismólogo ha de empezar por identificar el mecanismo desencadenante. Si se trata de un suceso sísmico, el próximo paso consistirá en datar las estructuras que deja en su estela.

1. AUNQUE MUCHAS DE LAS PERSONAS que habitan en los alrededores del lago de Lucerna conviven con la amenaza de aludes, corrimientos de tierra y catástrofes naturales similares, son muy pocas las que piensan en la posibilidad de un terremoto. Pero esa región se ha visto sacudida en varias ocasiones por episodios sísmicos violentos. El que se produjo en 1601 causó daños considerables en la ciudad de Lucerna (*en la imagen*). Sin embargo, no hay constancia histórica de otros terremotos de magnitud similar, por lo que venía resultando muy difícil pronosticar la probabilidad de una recurrencia. Para estimar mejor ese riesgo, los autores emprendieron el estudio de los sedimentos que se acumulan bajo el lago. La inspección de este archivo natural reveló que otros cuatro grandes temblores destrozaron este pintoresco escenario en el curso de los últimos milenios.

Los sedimentos: archivos geológicos

Los sedimentos lacustres constituyen excelentes archivos de las condiciones ambientales del pasado. Acumulados año tras año, se han convertido en un registro completo,

y en ocasiones detallado, de la historia geológica de lagos y lagunas. En las zonas que estudiamos del lago de Lucerna, los depósitos crecen, desde hace varios milenios, algo menos de un milímetro anualmente. La composición de este material



2. LA ACTIVIDAD SISMICA se concentra en los límites entre placas tectónicas (*líneas rosadas*). En ocasiones, sin embargo, algunos terremotos de gran magnitud se producen en el interior de las placas. Los puntos rojos indican los lugares que, desde 1973, han sufrido terremotos de magnitud 5,5 o superior. La ubicación de los bordes de las placas se ha obtenido del Proyecto de Descubrimiento de Bordes de Placas, de la Universidad de Rice. Los epicentros de los terremotos proceden del catálogo del Centro Nacional de Información de Terremotos, del Servicio Inspección Geológica de los EE.UU.

refleja las condiciones locales en la época de la deposición. El polen que trae el aire, por ejemplo, queda enterrado en el sedimento fangoso del fondo del lago; se convierte así en un registro de los cambios de la vegetación de las cercanías. Las capas de grano grueso, por su parte, nos retrotraen a épocas en que las inundaciones arrastraron residuos arenosos hasta el lago.

También los terremotos dejan sus huellas en el fondo de lagos y océanos: los temblores hacen que los sedimentos resbalen por las pendientes sumergidas de las márgenes de esas masas de agua. El terremoto de Grand Banks en 1929, por ejemplo, de magnitud 7,2 en la escala de Richter, desencadenó un deslizamiento gigantesco en la vecindad de las costas canadienses de Terranova. El desplazamiento brusco de materiales a lo largo de la pendiente continental originó un maremoto arrasador y cortó las comunicaciones transatlánticas cuando la masa ingente de espeso fango segó varios cables telefónicos submarinos que se encontraban en su camino.

Ante tales sucesos, nos pareció razonable pensar que los sedimen-

tos de varios lagos suizos habrían registrado de forma semejante episodios sísmicos del pasado. Tras un extenso sondeo y estudio de las profundidades del lago de Lucerna se confirmó nuestra hipótesis: de acuerdo con los hallazgos, cuatro importantes terremotos sacudieron esta zona en tiempos prehistóricos.

El relato de Cysat

Nuestra primera tarea consistió en establecer qué clase de signature sísmica debíamos buscar en los sedimentos del lago. Para ello, el informe de Cysat sobre el suceso de 1601 constituía un documento de valor incalculable. A la mañana siguiente al terremoto, él y sus compañeros del ayuntamiento cabalgaron hacia el lago para estimar los daños. Reseñó un cuadro caótico:

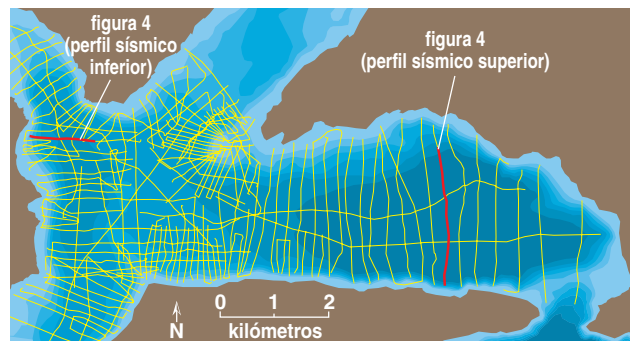
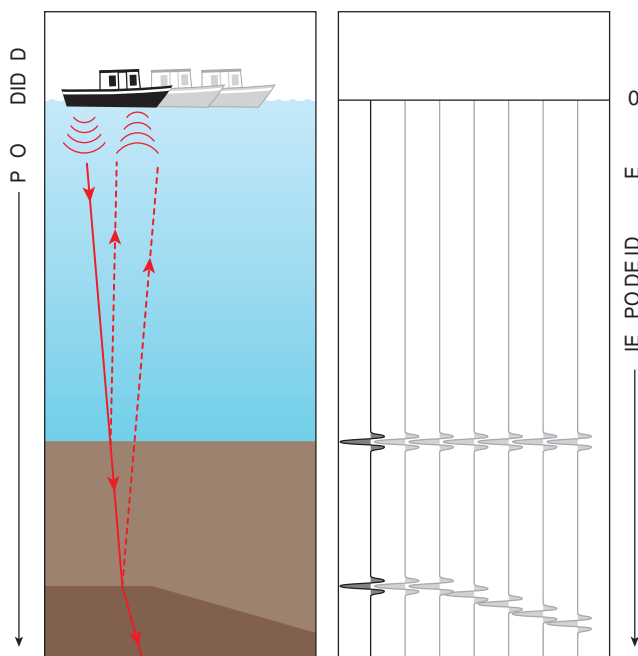
A lo largo de la orilla encontramos embarcaciones, troncos, tablones, tubos y todo tipo de objetos. Unos flotaban a la deriva; otros habían sido arrojados a la playa y depositadas 50 pasos [de 40 a 50 metros] más allá de la línea costera y hasta dos halberds [de tres a cuatro metros] por encima del nivel

del lago... Cerca de la ciudad, algunas personas recogían peces que habían sido arrojados hacia la ribera... En Lucerna, el maremoto había arrancado los amarres de las embarcaciones, que derivaban lago adentro. Andaban veloces, pero no por el viento, remos o velas... Preternaturalmente, el gran río Reuss [el desagüe del lago Lucerna] invertía el flujo de sus aguas, hacia delante o hacia atrás, seis veces cada hora...

Cysat señalaba, además, que el río que partía la ciudad en dos desapareció casi por completo varias veces. Incluso “se podía cruzar su lecho casi sin mojarse los pies, como hicieron los más jóvenes para conmemorar tan extraordinario suceso... Asimismo, los molinos [de agua] dejaron de funcionar”. Cysat observó también que las “montañas y colinas subacuáticas, a las que se llegaba por barras de arena durante la bajada de las aguas, desaparecieron bajo las profundidades del lago. (...) Secciones de praderas se desplazaron una distancia considerable de sus posiciones originales y se abrieron profundas grietas en el suelo”.

A tenor de este relato, cabía esperar que esos sucesos espectaculares hubieran dejado huellas en el fondo del lago. De hecho, a principios del decenio de 1980, miembros del Laboratorio de Limnogeología del Instituto Politécnico Federal de Zurich (ETH, de “Eidgenössische Technische Hochschule”, en alemán) hallaron indicios que respaldaban nuestra hipótesis: en el fondo del lago, había dos grandes depósitos producidos por deslizamientos subacuáticos de fangos que parecían tener relación directa con el seísmo de 1601.

En 1996, al poco de hacerse cargo del Laboratorio de Limnogeología, la profesora McKenzie, coautora del artículo, prestó todo su apoyo al proyecto. Junto con otro de los firmantes (Anselmetti), descubrió numerosos depósitos de deslizamiento, muchos de ellos más profundos que los hasta entonces investigados. Siendo más antiguos, estos materiales debieron depositarse en tiempos prehistóricos. Por tanto, si pudiéramos distinguir los deslizamientos pro-



3. DETALLES ESTRUCTURALES de los sedimentos del lago de Lucerna, cartografiados mediante reflexión sísmica. Este método se sirve de las leyes acústicas. En un barco oceanográfico se instala un transductor que emite ondas sonoras hacia el agua. Estas se reflejan parcialmente en el fondo del lago y en las interfaces entre capas sedimentarias de distinta composición (*extremo izquierdo*). Cuando regresan a la superficie, el mismo transductor capta los débiles ecos, que se registran electrónicamente. La iteración de este proceso, a pequeños intervalos, y la transcripción de los resultados consecutivos (*izquierda*) reproducen la estructura de los sedimentos. Navegando unos 300 kilómetros en zigzag, los autores obtuvieron perfiles sísmicos que les permitieron cartografiar la parte occidental del lago (*arriba*).

vocados por terremotos de los corrimientos debidos a otros procesos, los depósitos arcaicos en cuestión aportarían testimonios de los últimos 15 milenios de historia sísmica de la zona.

Por esa misma fecha Giardini, coautor también, andaba buscando un catálogo extenso de seísmos. En razón de su cargo (técnico en riesgos sísmicos potenciales de la Confederación Helvética), necesitaba saber dónde, cuándo y con qué frecuencia se habían producido grandes terremotos. Cuando Anselmetti publicó los descubrimientos del lago de Lucerna, Giardini se dio cuenta inmediatamente de que esos depósitos de deslizamiento constituían unos indicadores genuinos, ignorados hasta entonces, del pasado sísmico de Suiza. Así empezó lo que sigue siendo una estrecha colaboración entre el Servicio Sismológico suizo y el Laboratorio de Limnogeología del ETH. Para completar el equipo se necesitaba savia nueva. La trajo Schnellmann, un estudiante de doctorado y firmante también del artículo.

Cartografía mediante reflexión sísmica

En junio de 2001, Schnellmann y Anselmetti transportaron el *Tethys*, el barco oceanográfico del ETH, al lago de Lucerna. Comenzaron a explorar los sedimentos del fondo me-

dante reflexión sísmica. Este método remeda la ecografía aplicada en medicina: así como los radiólogos exploran el interior del organismo mediante ultrasonidos, los geólogos utilizan las señales acústicas para elaborar imágenes de la estructura interna de los sedimentos. En el casco del barco se instala un transductor acústico que, como un altavoz, emite ondas sonoras hacia el agua. Estas se reflejan parcialmente en el fondo del lago y en las separaciones entre capas sedimentarias de distinta composición. Cuando regresan a la superficie, el mismo transductor (que ahora opera como un micrófono) capta el eco. La señal acústica reflejada proporciona información acerca de la estructura de los sedimentos.

Navegando en zigzag, sondeamos una densa malla de líneas de exploración que, en total, sumaban más de 300 kilómetros de recorrido. Los resultados de la reflexión sísmica permitieron construir una imagen tridimensional de los sedimentos del lago. El análisis cuidadoso posterior de los datos en el laboratorio sacó a la luz indicios sólidos de movimientos de masas subacuáticas: marcas de fracturas en los taludes, debidas al desprendimiento

de grandes masas de tierra, y depósitos de deslizamiento enterrados, que señalan dónde se posó el material despegado. Tales acumulaciones se reconocen fácilmente en los cortes sísmicos porque los sedimentos normales, no perturbados, del lago muestran una distribución horizontal en capas bien definidas; en cambio, los depósitos de deslizamiento, intensamente removidos, revelan una configuración caótica, semejante a la imagen "nevada" que ofrece la pantalla de un televisor sin sintonizar.

Tras docenas de cortes verticales separados por una corta distancia, pudimos seguir la pista de las capas prominentes y determinar así la extensión de cada uno de los desprendimientos a través de la sección del lago que habíamos inspeccionado. (El lago de Lucerna cuenta con varias cuencas independientes. Decidimos no examinar las adyacentes a deltas de ríos porque podían ser fuente de depósitos de desprendimientos sin relación alguna con los terremotos.) Muchos de los depósitos, advertimos, se hallaban exactamente en el mismo nivel que los detectados, y asociados al terremoto de 1601, por el anterior grupo de investigación del ETH. De hecho,

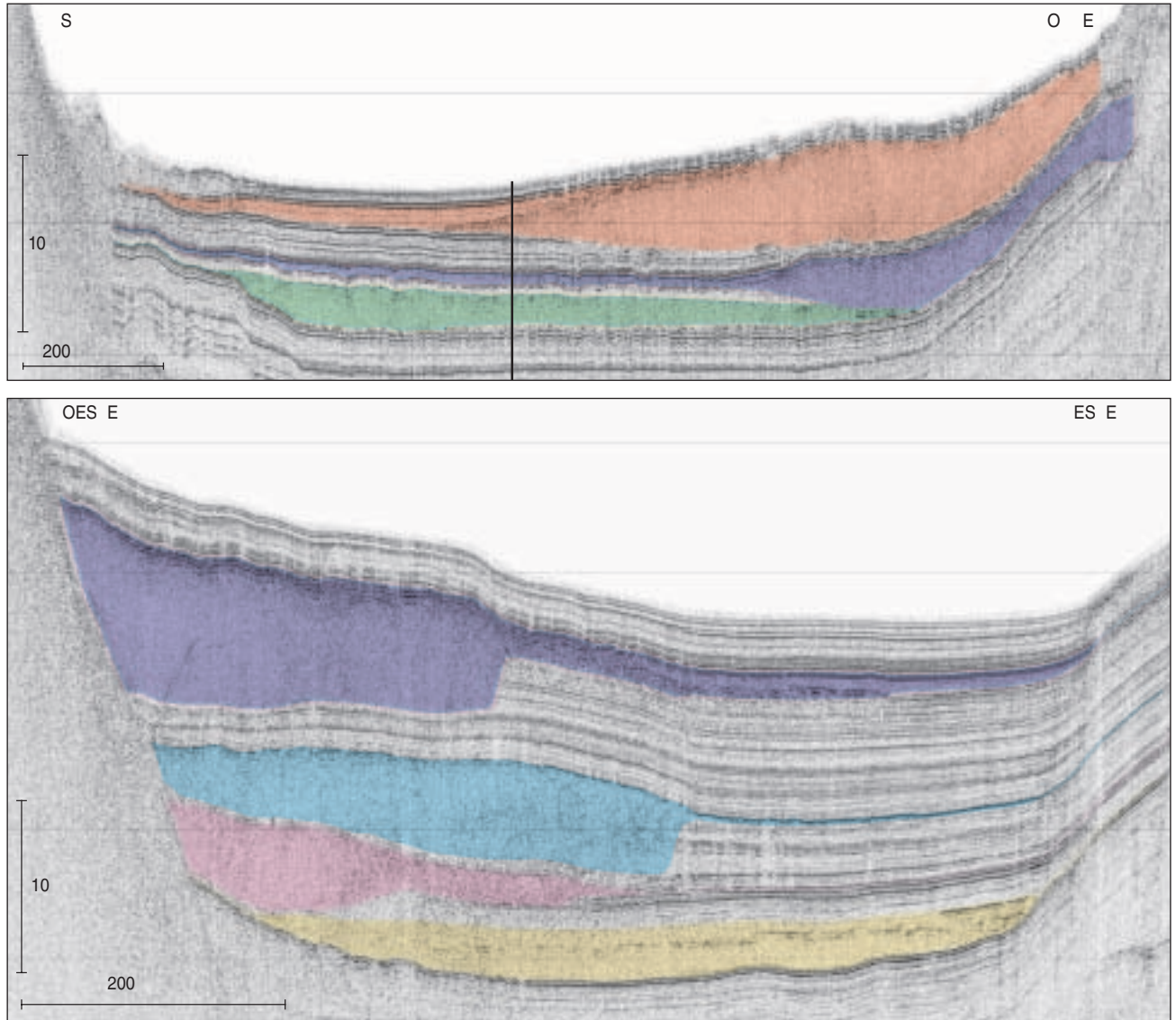
el horizonte (nivel estratigráfico) correspondiente a este suceso contiene al menos 13 hundimientos, lo que indica que el terremoto desencadenó resbalamientos sincrónicos en todo el lago. Es más, hallamos que, en el centro de dos subcuencas bien separadas, estos depósitos de deslizamiento aparecían recubiertos por capas de fango homogéneo de hasta dos metros de espesor: resultado, sin duda, de una gran cantidad de material removido

que se mantuvo en suspensión durante un corto período de tiempo tras el seísmo, antes acabar sedimentándose.

¿Hubo algún otro terremoto anterior al de 1601? En busca de depósitos correspondientes a otros episodios sísmicos, examinamos con minuciosidad los cortes verticales. Descubrimos un horizonte, unos tres metros por debajo del fondo del lago, que contiene 16 desprendimientos. Sobre esos depósitos descansan ma-

sas espesas y homogéneas de fangos, en tres subcuencas diferentes. Ello nos indujo a sospechar que nos hallábamos ante los vestigios de seísmos violentos de un pasado remoto. ¿O tenían una explicación más trivial?

Una observación nos decantó hacia la hipótesis sísmica. Los restos de aquellos antiguos resbalamientos de fangos se encontraban no sólo al pie de los taludes que bordean las márgenes del lago, sino tam-



4. PERFILES DE REFLEXION SISMICA obtenidos en dos cruces de rastreo. Revelan depósitos característicos de hundimientos a lo largo de la margen del lago (*zonas coloreadas*). La imagen superior muestra una sección norte-sur que corta por el centro una cuenca extensa y profunda (*línea roja a la derecha en el mapa de la figura 3*). La imagen inferior corresponde a una sección este-oeste próxima a la ribera occidental (*línea roja a la izquierda en el mapa de la figura 3*). Las zonas coloreadas presentan una configuración caó-

tica, como la imagen "nevada" de la pantalla de un televisor sin sintonizar. Las otras capas sedimentarias, en cambio, muestran líneas continuas claras y oscuras. Estos y otros cortes sísmicos orientaron la posterior tarea de extracción de testigos sedimentarios. Se escogieron posiciones clave como el centro de la gran cuenca (*línea negra en la imagen superior*), donde la sonda, de aproximadamente 10 metros de largo, penetró en tres depósitos inducidos por hundimiento de diferentes edades (*rosado, púrpura, verde*).

5. EL ANALISIS DE LOS TESTIGOS SEDIMENTARIOS permitió a los autores confirmar su interpretación de las secciones sísmicas y obtener material orgánico apropiado para la datación. La imagen corresponde a la extracción indicada en la figura anterior (*derecha*, colocada en su posición estratigráfica correcta y ampliada horizontalmente para mayor claridad). Muestra una buena correspondencia con el perfil sísmico de este punto (*izquierda*). La capa rosada corresponde a un depósito de hundimiento acumulado en 1601, durante y poco después de un terremoto histórico. La capa púrpura muestra un depósito de deslizamiento más delgado, formado en 470 a.C. según la datación por radiocarbono. La capa verde representa un episodio anterior, aunque probablemente no se trató de un terremoto, pues causó un solo depósito de hundimiento.

bién en la vecindad de dos colinas sumergidas; la cima de una se encuentra a unos 85 metros por debajo de la superficie del lago. Las olas inducidas por tempestades o inundaciones generalizadas también podrían haber desencadenado deslizamientos alrededor del margen del lago, pero no habrían afectado la estabilidad de las pendientes del fondo, alejadas de la costa y a una profundidad de 85 metros. No cabía duda: se trataban de las huellas de un antiguo terremoto.

Testigos y datación

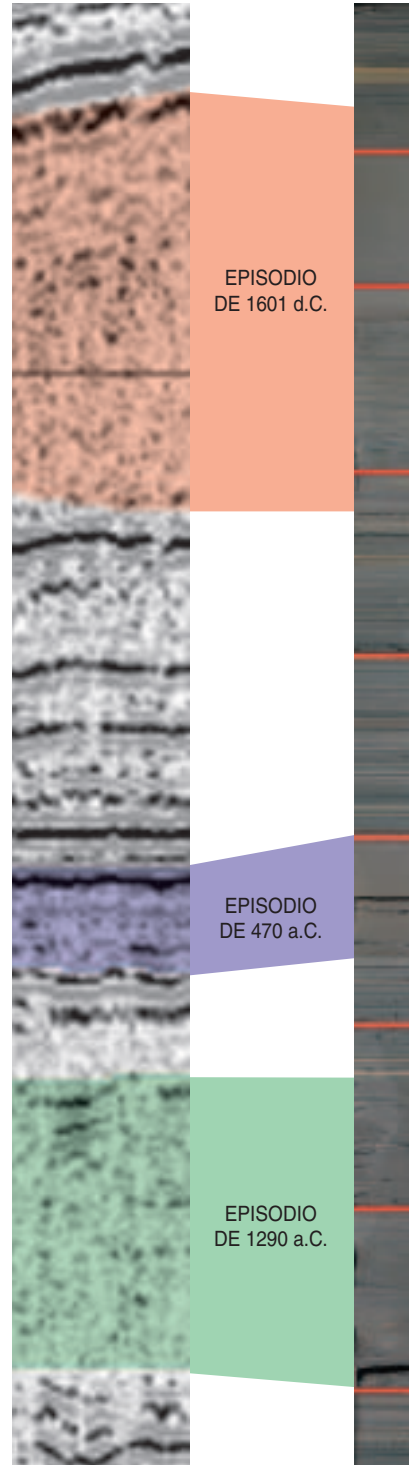
La inspección de los sismogramas reveló la existencia de otros tres temblores prehistóricos. Fueron lo bastante intensos para producir deslizamientos múltiples, pero todavía nos hallamos lejos de precisar su magnitud. Ni siquiera podemos fiarnos de lo que a primera vista parece una hipótesis razonable; a saber, cuanto mayor sea el terremoto, tanto más sedimento remueve. El mayor depósito de deslizamiento identificado (de unos 17 millones de metros cúbicos de fango), por ejemplo, no se debió a un episodio de gran violencia sino a un débil terremoto, o quizás a un proceso completamente diferente. Así lo creemos porque este enorme desprendimiento responde a un suceso aislado; en aquella época no se produjeron otras rupturas de taludes en el lago.

Pese a no poder cuantificar la magnitud de esos terremotos, creemos que deben de haber sido bastante intensos. Después de todo, esta parte de Suiza ha experimentado muchos pequeños seísmos a lo largo del siglo pasado (cinco episodios alcanzaron una magnitud 5 o superior) y ninguno de ellos ha producido fracturas múltiples de taludes en nuestra zona de estudio.

¿Cuándo tuvieron lugar esos terremotos? Para datar esos sucesos, necesitábamos testigos de sedimentos de los distintos depósitos de deslizamiento, que descansan a gran profundidad bajo el fondo del lago. (El suelo del lago se halla a 150 metros de profundidad.) Así pues, volvimos al lago con un pequeño pontón y una sonda de Kullenberg (o de pistón): un aparato de muestreo que consta en nuestro caso de un tubo de acero de 12 metros de largo con un peso de plomo de 300 kilogramos encima. Para tomar muestras de sedimentos, la sonda descende lentamente a través de la columna de agua, asistida por un cable de acero unido a un potente torno. A 10 metros del fondo del lago, un mecanismo libera el tubo, que cae libremente el resto de la distancia. El tubo penetra en los sedimentos y se llena de fango. En su extremo inferior, un resorte impide que el testigo muestra se pierda en el camino de vuelta a la superficie.

Guiados por los cortes verticales sísmicos, extrajimos muestras de sedimentos de varios depósitos de deslizamiento, así como de sedimentos no perturbados. En total: ocho testigos, cada uno de 8 a 10 metros de longitud, de dos subcuencas diferentes. Se trataban de depósitos de deslizamiento tortuosamente doblados con lechos superpuestos de fango homogéneo. Estos empaquetamientos se diferenciaban claramente de las delgadas capas horizontales encontradas en otras partes del sedimento.

Para hallar la edad de cada depósito de deslizamiento, extrajimos hojas y pequeños trozos de madera del sedimento no perturbado suprayacente. La antigüedad del material orgánico se determinó mediante datación por radiocarbono. En los se-



dimentos también se hallaron dos capas horizontales de cenizas que se asociaron a erupciones volcánicas prehistóricas en el este de Francia y el oeste de Alemania. Combinando todas las fechas, las del material orgánico y las de las cenizas volcánicas, calculamos las edades de los depósitos de deslizamiento y las de los cuatro terremotos que los originaron: se produjeron, aproximadamente, en 470 a.C., 7820 a.C., 11.960 a.C. y 12.610 a.C. Así logramos reconstruir una cronología de los sucesos sísmicos prehistóricos de la Suiza central.



Tsunamis lacustres

Quedaba aún por responder una de las preguntas formuladas por Cysat: ¿A qué respondía la agitación relatada de las aguas del lago? Los deslizamientos subacuáticos de fangos del tamaño que observamos, ¿pueden acaso desplazar suficiente agua como para generar olas de 4 metros de altura? Dichas olas, que se podrían considerar una especie de tsunamis, ¿encierran un grave peligro para los pueblos ribereños?

Para estimar la forma y amplitud de las olas generadas por el terremoto, Schnellmann y Anselmetti acudieron a un experto en simulación teórica de tsunamis (Ward). Estas olas arrasadoras, que suelen

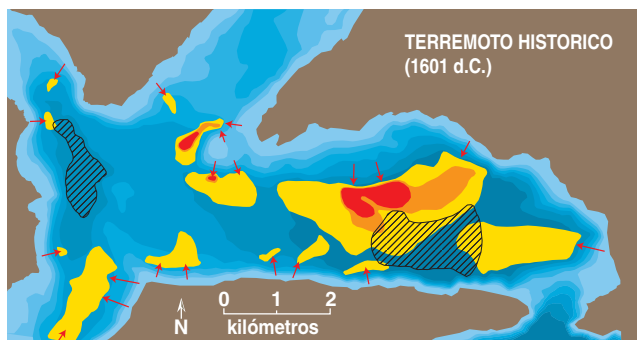
6. EN 1687, una ola de 4 metros de altura sacudió esta casa construida a la orilla del lago de Lucerna. Abatió las ventanas del primer piso e inundó el interior, volcando una mesa y derribando al propietario. La ola imponente causó estragos en un pueblo cercano y en ensenadas. El cielo estaba despejado y reinaba la calma. No se formó por causas meteorológicas, sino como resultado del hundimiento espontáneo de sedimentos en la orilla opuesta, donde una fracción importante del delta de un río desapareció de repente. Este ejemplo histórico muestra que los hundimientos de sedimentos y sus olas asociadas no provienen necesariamente del temblor del suelo. De aquí que los autores se concentraran en una parte del lago alejada de los grandes deltas. Atribuyeron a terremotos sólo aquellos sucesos que simultáneamente dejaron múltiples depósitos de deslizamiento en sus estelas.

originarse en grandes movimientos de sedimentos en el fondo marino, han sido objeto de estudio por los geólogos marinos desde hace tiempo. Pero el comportamiento de tales masas de agua en lagos apenas si se ha abordado.

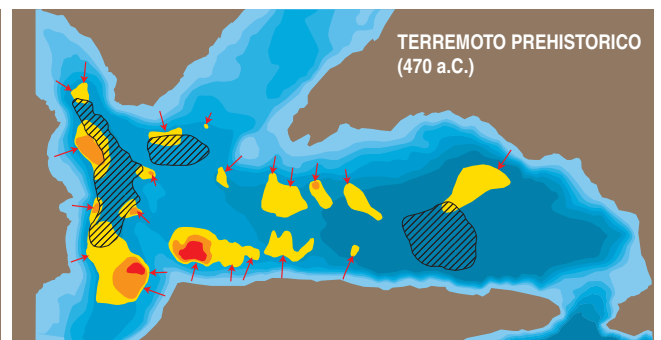
Para comprender mejor la relación entre los temblores de tierra en el lago de Lucerna y la generación de olas gigantes, modelamos los efectos del deslizamiento subacuático del episodio de 470 a.C. Lo seleccionamos porque disponíamos de información cartográfica suficiente para reconstruirlo con cierto detalle: conocíamos uno de los lugares donde el fondo se había arrancado, la trayectoria de los sedimentos y la geometría del depósito resultante. Los datos de reflexión sísmica mostraron que el material se desprendió de la orilla del lago, dejó una mella de nueve metros y transportó 100 metros cúbicos de sedimentos, parte de los cuales se deslizaron lateralmente hasta 1500 metros.

La simulación teórica mostró olas de más de tres metros de altura azotando la orilla opuesta al punto de fractura un minuto después del comienzo del deslizamiento. Su longitud de onda superaba el kilómetro, lo que es enteramente diferente de las olas superficiales ordinarias inducidas por el viento. En este sentido, las olas simuladas se elevaban como montañas de agua en el centro de la subcuenca, exactamente como lo describieron los testigos presenciales del episodio de 1601. Los movimientos de tierra combinados con los tsunamis resultantes debieron configurar una escena realmente atemorizadora.

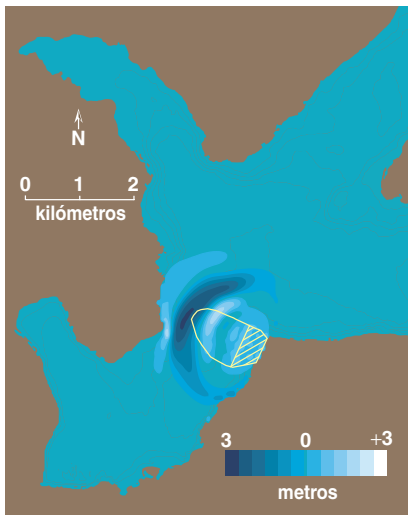
En su informe de 1601, Cysat indicaba que la salida normal del lago experimentó inversiones, moviéndose hacia atrás y hacia delante seis veces en una hora. El período del movimiento del agua era, pues, de unos 10 minutos; unas diez veces mayor que el de los tsunamis generados en el modelo teórico.



7. EL TERREMOTO DE 1601 (*izquierda*) generó varios depósitos de deslizamiento, cuyo espesor osciló entre menos de 5 (*amarillo*) y más de 10 metros (*rojo*). (Los de espesor intermedio —más de 5 y menos de 10 metros— aparecen en *naranja*.) En las partes más profundas del lago, esos depósitos están cubiertos por una capa espesa y homogénea de fango (*rayado*), resultado de todo el mate-



rial removido que temporalmente se mantuvo en suspensión. Un conjunto de depósitos similar, aunque más antiguo (*derecha*), indica que un terremoto prehistórico debió desencadenar hundimientos en varios puntos del lago (*flechas*). No se atribuyen a inundaciones y otros posibles desencadenantes porque sólo un seísmo podía haber arrancado las laderas de colinas sumergidas, como ocurrió en este caso.



8. LA SIMULACION TEORICA pone de manifiesto que basta una fractura en la margen del lago (*área rayada*), con el consiguiente depósito de deslizamiento (*contorno amarillo*), para desencadenar una perturbación de la superficie semejante a un tsunami. El depósito de la figura corresponde a uno de los causados por el terremoto de 470 a.C. A diferencia de las olas normales, levantadas por el viento, las ondulaciones desatadas por temblores de tierra tienen una longitud de onda muy larga, de casi un kilómetro. El tamaño también es enorme: un minuto después de que la orilla del lago se hunda en la simulación, la al-

tura de la ola (de cresta a seno) alcanza casi los seis metros (*izquierda*). La perturbación se propaga rápidamente, a la misma velocidad que el tráfico en una autopista. Se aleja de la zona de ruptura y se adentra dos kilómetros en dos de los brazos del lago durante el minuto siguiente (*centro*). Tres minutos después del inicio del simulacro, la perturbación queda, en gran parte, confinada al brazo noroeste (*derecha*). En realidad, las múltiples fallas en diferentes puntos de la orilla del lago generaron varias olas de este tipo. Al interferir unas con otras, crearon un patrón de interferencia complejo.

Probablemente, las oscilaciones empezaron con una frecuencia más elevada (frecuencia y período son inversamente proporcionales), pero la interferencia entre las olas que avanzaban hacia delante y las que regresaban hacia atrás terminó por disminuirla. El período del movimiento resonante de una gran masa de agua ("seiche") depende de la geometría de la cuenca. El viento y las variaciones de presión atmosférica causan oscilaciones similares, aunque de menor amplitud. Tales ondas estacionarias inducidas meteorológicamente se estudiaron en el lago de Lucerna por primera vez a finales del siglo XIX. Revelaron cambios de sentido cada 10 minutos, además de otros dos períodos de oscilación más largos. Por tanto, resulta razonable que el período de los movimientos inducidos por los terremotos muestre también esos valores.

Así pues, los sedimentos del lago de Lucerna permitieron comprender el suceso de 1601 y otros anteriores, como si de sismógrafos prehistóricos se tratara. Nuestro actual reto consiste en estimar el epicen-

tro y la magnitud de dichos terremotos. Un proyecto ambicioso. Pero no bastan los datos que ofrece un lago. Se requiere una red de paleosismógrafos que operen en varios de forma independiente. En colaboración con el Servicio Sismológico

suizo, el grupo de limnogeología del ETH centra ahora sus esfuerzos en cuatro lagos menores próximos al de Lucerna, en busca de huellas de terremotos históricos y prehistóricos que permitan estimar epicentros y magnitudes.

Los autores

Michael Schnellmann está terminando el doctorado en geología en el Instituto Politécnico de Zurich (ETH), donde **Flavio S. Anselmetti**, su tutor, dirige el Laboratorio de Limnogeología. **Domenico Giardini** imparte clases de sismología y geodinámica en el ETH y es el responsable del Servicio Sismológico suizo. **Judith A. McKenzie** ha investigado la sedimentación química y bioquímica en lagos modernos y en océanos. Enseña estratigrafía en el ETH. **Steven N. Ward** pertenece al cuerpo docente e investigador de la Universidad de California en Santa Cruz. Se dedica a la simulación de procesos dinámicos terrestres: terremotos, tsunamis y deformaciones tectónicas. © *American Scientist Magazine*.

Bibliografía complementaria

- SEICHES. B. J. Korgen en *American Scientist*, vol. 83, págs. 330-342; 1995.
- LANDSLIDE TSUNAMI. S. N. Ward en *Journal of Geophysical Research*, vol. 106; págs. 11.201-11.216; 2001.
- PREHISTORIC EARTHQUAKE HISTORY REVEALED BY LACUSTRINE SLUMP DEPOSITS. M. Schnellmann, F. S. Anselmetti, D. Giardini, J. A. McKenzie y N. S. Ward en *Geology*, vol. 30, págs. 1131-1134; 2002.
- SUBOCEANIC LANDSLIDES. S. N. Ward y S. Day en *2002 Yearbook of Science and Technology*. McGraw-Hill; Nueva York, 2002.