

Patrimonio geológico efímero: propuesta metodológica para el inventario y evaluación de las estructuras generadas por licuación de suelos durante sismos, San Juan-Argentina

Ephemeral geological heritage: methodological proposal for the inventory and evaluation of structures generated by soil liquefaction during earthquakes, San Juan-Argentina

Silvia Beatriz Palacios^{1*}, Laura Patricia Perucca²

¹ Gabinete de Neotectónica y Geomorfología. INGENIO. FCFyN-UNSJ. Avda. Ignacio de la Roza 590 Oeste. Complejo Universitario Islas Malvinas. Departamento Rivadavia, 5402, San Juan, Argentina.

² CONICET- CIGEOBIO. FCFyN-UNSJ. Avda. Ignacio de la Roza 590 Oeste. Complejo Universitario Islas Malvinas. Departamento Rivadavia, 5402 San Juan, Argentina.

* Autor para correspondencia: (S. Palacios) silbea09@gmail.com

Cómo citar este artículo:

Palacios, S.B., Perucca, L.P., 2020, Patrimonio geológico efímero: propuesta metodológica para el inventario y evaluación de las estructuras generadas por licuación de suelos durante sismos, San Juan-Argentina: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 72 (1), A020919. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2020v72n1a020919>

Manuscrito recibido: Septiembre 19, 2018
Manuscrito corregido: Noviembre 20, 2018
Manuscrito aceptado: Noviembre 26, 2018

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

En este trabajo se valoran algunos rasgos de licuación como estructuras de patrimonio efímero. Estas estructuras generalmente se forman durante terremotos de magnitud moderada a grande y registran información importante sobre las características de los eventos sísmicos. De esta manera, es posible actuar apropiadamente para su tratamiento y conservación en el momento de su formación. El estudio del Patrimonio Geológico Efímero es un tema de investigación reciente en geología que constituye recursos científicos y culturales. Los terremotos de 1894, 1944, 1952 y 1977 acontecidos en la provincia de San Juan, Argentina, produjeron estructuras de licuación como grietas, volcanes de arena, cráteres y asentamientos diferenciales, las que ocasionaron importantes daños a las viviendas y al sector agroindustrial de la región. Existen numerosos registros fotográficos de tales efectos secundarios. En este trabajo, el análisis de estas estructuras se limitó a la región distal del valle del Tulum, ya que estos sectores son muy susceptibles a la licuación de suelos. El objetivo de este estudio es establecer pautas para preservar las estructuras de *in situ*, teniendo en cuenta la fragilidad del material y el tiempo de conservación natural efímero. Finalmente, se dan algunas recomendaciones básicas para el relevamiento de estructuras de licuación *in situ* a fin de que en un futuro quede establecido un protocolo aceptado por la comunidad científica para considerarlas como patrimonio efímero.

Palabras clave: terremoto, licuación, patrimonio efímero, valle de Tulum, Argentina.

ABSTRACT

In this work, several features of liquefaction are valued as ephemeral heritage structures. These structures usually form during earthquakes of moderate to large magnitude and record important information about the characteristics of the seismic events. In this way, it is possible to act appropriately for their treatment and conservation at the time of its formation. The study of Ephemeral Geological Heritage is a recent research topic in geology that constitutes scientific and cultural resources. The 1894, 1944, 1952, and 1977 earthquakes with epicenters in the province of San Juan, Argentina induced liquefaction structures such as cracks, sand volcanoes, craters, and differential settlements, which caused serious damage to dwellings, and agro-industry in the region. There are several photographic records of such secondary effects. In this work, the analysis of these structures was limited to the distal portion of the Tulum valley, since these areas are susceptible to soil liquefaction. The objective of this study is to establish guidelines for preserving in situ liquefaction structures, considering the fragility of the material and the natural ephemeral time of preservation. Finally, we give some basic recommendations for a survey of liquefaction structures in situ so that in the future, a protocol may be established and accepted by the scientific community for designating ephemeral heritage structures.

Keywords: earthquake, liquefaction, ephemeral heritage, Tulum valley, Argentina.

1. Introducción

La licuación es un término usado para describir un proceso, en el cual la resistencia y la rigidez de un depósito de suelos se reducen debido a un aumento de la presión de poros. Aunque es posible que el proceso se produzca por cargas estáticas, éste es más comúnmente inducido por cargas cíclicas. El proceso se manifiesta en arenas o arenas limosas sueltas, saturadas y limpias. También ha sido observado en gravas y limos poco plásticos (Rodríguez-Pascua, 1997; Mörner *et al.*, 2003).

Si bien los estudios de licuación de suelos son numerosos mundialmente, en Argentina aún no han sido lo suficientemente estudiados y todavía no se han reconocido a las estructuras de licuación como fuente importante de datos sísmicos. Autores como Palacios *et al.* (2017) propusieron una metodología con el fin de evaluar la susceptibilidad a la licuación al norte del río San Juan.

Para ello, evaluaron y ponderaron factores como distribución y tamaño del grano, origen y edad del depósito, profundidad de los estratos licuables, tipos de suelos, aceleración superficial máxima, magnitud del sismo en función de la distancia epicentral, profundidad del nivel freático y licuación histórica. Lo anterior ha permitido una zonificación de la susceptibilidad a la licuación en el área de estudio más completa y certera.

También se han llevado a cabo estudios para evaluar la energía mínima de un terremoto capaz de inducir licuación en un sitio determinado. Por ejemplo, Kuribayashi y Tatsuoka (1975) obtuvieron la correlación entre la distancia epicentral máxima de los sitios licuados y la magnitud asociada para fuertes terremotos en Japón. Ambraseys (1988) consideró tanto la distancia epicentral como la de falla para calcular las relaciones entre la magnitud del momento y la distancia para 137 eventos de licuación dispersos por todo el mundo. Papadopoulos y Lefkopoulos (1993) obtuvieron una ecuación límite para las curvas propuestas por Ambraseys (1988). Por otra parte, Youd y Keefer (1978) graficaron más de 40 eventos sísmicos mundiales estableciendo una relación entre la

magnitud Richter y la máxima distancia epicentral de un sitio donde hubo licuación.

El método de límite superior de magnitud fue aplicado por Galli (2000) a las licuaciones históricas inducidas por 61 terremotos ocurridos en Italia desde 1117 A.D. hasta 1990 A.D., relacionando el epicentro, intensidad I_0 , magnitud M_s y equivalente momento de magnitud. Otros autores como Castilla y Audemard (2007) confeccionaron una base de datos mundial de volcanes de arena aislados inducidos por procesos de licuación para establecer relaciones empíricas entre los parámetros de los terremotos y las geometrías de los volcanes de arena. Estos autores determinaron que las curvas resultantes de estas relaciones empíricas se pueden utilizar posteriormente para el estudio de los terremotos históricos y prehistóricos que formaron volcanes de arena. El estudio detallado de los efectos inducidos después de cada terremoto moderado a grande y la incorporación de nuevos datos, mejora el método empírico-analítico de estos procesos. De ahí la necesidad de estudiar las estructuras *in situ* y considerarlas como patrimonio efímero. Durante los terremotos históricos de 1894, 1944, 1952 y 1977 ocurridos en la provincia de San Juan, se registraron numerosas estructuras de licuación de suelos en los valles de Tulum y Zonda (Figuras 1 y 2). Los suelos que constituyen la planicie aluvial del valle de Tulum están conformados por arenas, limos y gravas. Estos sedimentos muestran un comportamiento plástico frente a los esfuerzos que, sumado a la presencia de agua subterránea que los saturaba, favoreció la licuación.

Por ejemplo, en el año del terremoto de 1977, debido a los grandes caudales derramados por el río San Juan se produjo un notable incremento en la disponibilidad de aguas para riego. Esto provocó el aumento del nivel de la falsa freática que, al momento del sismo, se encontraba próxima a la superficie del terreno en gran parte de las áreas que sufrieron licuación, principalmente en amplias zonas de Albardón, Angaco, San Martín y Caucete (Figura 1). Por otra parte, se entiende como patrimonio geológico a un amplio conjunto

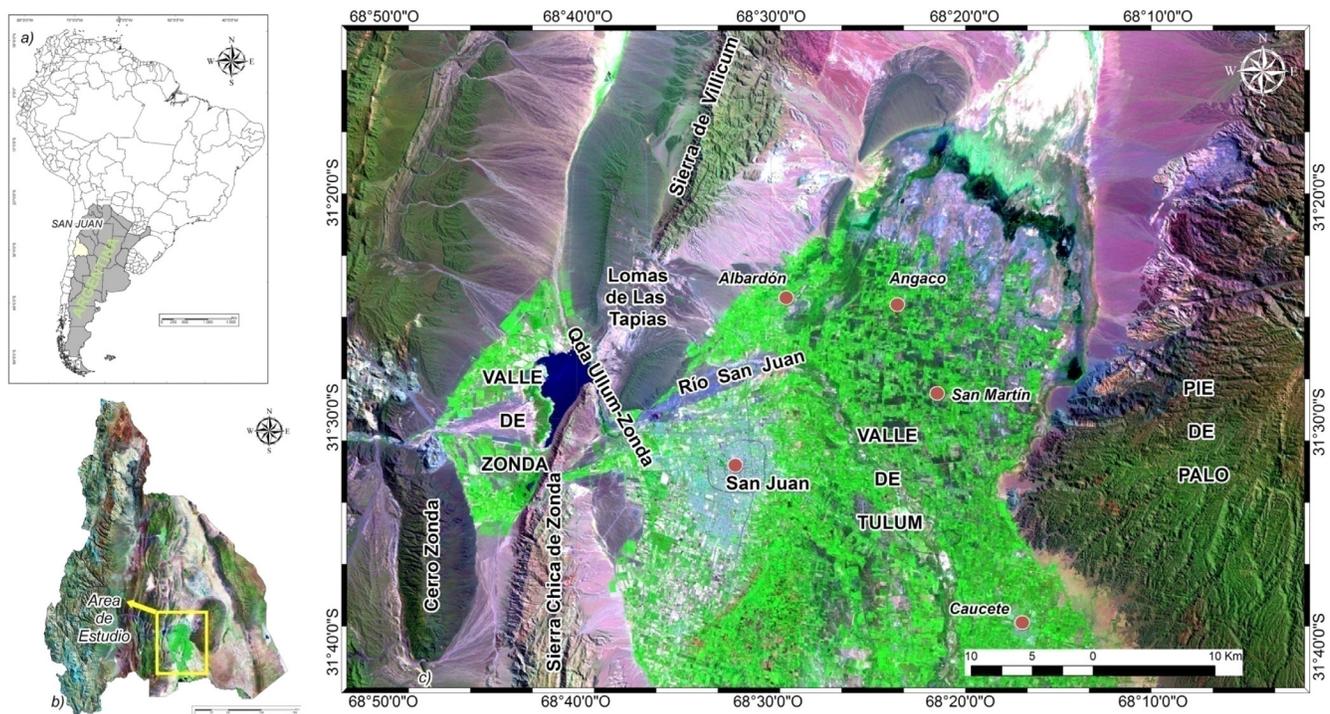


Figura 1 Ubicación del área de estudio en la provincia de San Juan, Argentina. Los círculos rojos indican las principales localidades del valle del Tulum.

de elementos, sin resultar excluyente su carácter inmueble y mueble, renovable o no renovable y perdurable o efímero (Carcavilla *et al.*, 2007). El término efímero es usado para referirse a algo de corta duración o pasajero. Según la RAE (2001) esta palabra es la suma de la palabra griega *epí* (alrededor) y *hemera* (día), por lo que ocurre alrededor de un día y no sobrepasa esa unidad temporal, es decir, que empieza y acaba rápidamente, de forma fugaz.

Autores como Díez-Herrero *et al.* (2011) definieron al patrimonio geológico efímero como un “conjunto de los recursos naturales geológicos de valor científico, cultural y/o educativo, normalmente formas del terreno, formaciones y estructuras geológicas, que permiten conocer, estudiar e interpretar los procesos que están modelando la Tierra, y cuyos elementos distintivos son de corta duración temporal, incluso inferior a un día”.

En este trabajo se pretende destacar la necesidad de realizar un levantamiento adecuado y con la mayor celeridad posible de las estructuras

de licuación *in situ* por su carácter efímero. Desafortunadamente, el reconocimiento de la evidencia de licuación inmediatamente después de ocurrido un sismo es generalmente no metódico, por lo que una buena manera de investigarlas sistemáticamente sería analizar los casos conocidos durante los eventos históricos. El enfoque metodológico propuesto en este trabajo para tratar las estructuras de licuación y considerarlas como un patrimonio efímero constituye una herramienta básica que permitirá confeccionar una base de datos de casos de ocurrencia de estas estructuras.

2. Ubicación del área de estudio

El área de estudio se ubica en la región centro-sur de la provincia de San Juan, República Argentina y comprende los valles de Tulum y Zonda. Limita al Norte con la sierra Villicum y Loma de las Tapias, al Oeste y Sur con el cerro Zonda y sierra Chica de Zonda y al Este con la sierra Pie de Palo.

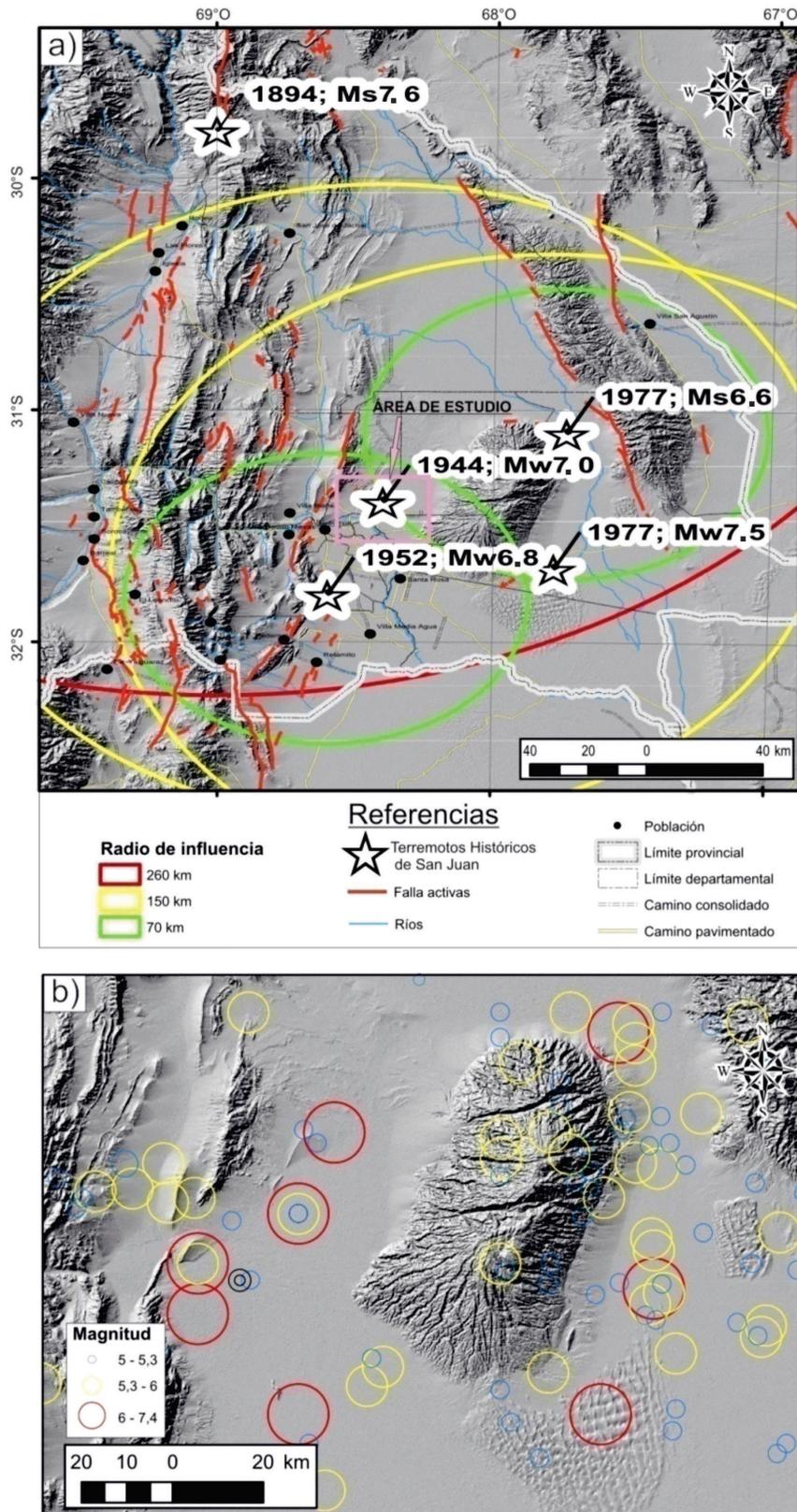


Figura 2 a) Ubicación de los terremotos históricos, fallas con evidencia de actividad tectónica cuaternaria. Los círculos de colores indican los radios de influencia de los efectos de licuación registrados. b) Epicentros de los sismos con magnitud mayor a 5.

El valle de Tulum está comprendido entre $31^{\circ} 20'$ y $32^{\circ} 08'$ de latitud sur y entre $68^{\circ} 10'$ y $68^{\circ} 40'$ de longitud oeste, con una superficie de 323 000 ha. La longitud del valle es de 100 km y su ancho entre 5 y 50 km. El valle de Zonda cubre una franja alargada orientada norte-sur de 15 km de largo y 10 km de ancho y se comunica con el valle de Tulum por las quebradas de Ullum-Zonda (Figura 1). Ambos valles constituyen en conjunto el área de mayor importancia agrícola de la región y es donde se concentra la mayor cantidad de población de la provincia de San Juan.

2.1. MARCO GEOLÓGICO

El Cuaternario en ambos valles está representado por los depósitos aluviales del Pleistoceno-Holoceno que cubren sus planicies aluviales por materiales de origen fluvial, eólico y por los depósitos coluviales que constituyen la bajada este y oeste actual de las sierras Villicum y Pie de Palo. La litología dominante es textural y composicionalmente muy variada. La misma está controlada por la litología local del área de procedencia, variando en la margen norte del río San Juan, de fanglomerados gruesos, en la sierra Pie de Palo, a arenas, gravas y limos finos al oeste en la sierra de Villicum (Ramos y Vujovich, 2000). El valle de Zonda corresponde a una depresión tectónica, elongada en sentido norte-sur que se sitúa dentro de la unidad morfo-estructural de la Precordillera.

El valle del Tulum se ubica al norte del río San Juan, entre dos ambientes morfoestructurales diferentes como son la sierra de Villicum en Precordillera y la sierra Pie de Palo en Sierras Pampeanas Occidentales. Por lo que en la potencia del relleno sedimentario influye la cercanía de uno y otro ambiente positivo, dando lugar a la interdigitación de los depósitos que originan la red fluvial que los drenan. Por otra parte, el río San Juan, de carácter antecedente y proveniente de la Cordillera Frontal, ha acumulado grandes cantidades de rodados, bloques, gravas, arena y limo-arcilla en sus tramos distales. Los depósitos alcanzan espesores que se incrementan desde los piedemontes de las sierras mencionadas hacia el centro del valle, variando de

10 a 500 m. Estos sedimentos son actuales y están sometidos a cambios en su disposición de acuerdo a las variaciones estacionales en el caudal de agua escurrido (Ramos y Vujovich, 2000). Además, en el valle de Zonda se destacan sedimentos finos de edad Pleistocena-Holocena, bordeando gran parte del valle y que aparecen en forma de remanentes.

Los efectos de la licuación en los suelos del valle de Zonda fueron reportados principalmente en el terremoto de 1952. Si bien no se cuenta con un registro fotográfico de estos procesos, fue posible recabar la información a partir de los relatos de algunos testigos.

2.2. CONCEPTOS GENERALES: DESPLAZAMIENTOS ASOCIADOS A LA LICUACIÓN DE SUELOS

La pérdida de cohesión del suelo permite su movilización originando diferentes desplazamientos asociados a la licuación. Los tipos más comunes de desplazamientos son:

Flotación: desplazamiento de objetos enterrados en el suelo bajo licuación. Tanques o tuberías de alcantarillado ascienden a través del suelo y flotan en la superficie de forma común (Figura 3a).

Pérdida de resistencia de soporte: reducción de la capacidad de soporte de los cimientos debido al debilitamiento del material del suelo subyacente o colindante, provocando que las estructuras se hundan o dañen (Figura 3b).

Propagación lateral: desplazamiento limitado de las capas superficiales del suelo a favor de pendientes suaves o hacia superficies libres, como en márgenes de ríos y taludes de terrazas fluviales. En este tipo de desplazamientos a menudo ocurre que las capas subsuperficiales están revestidas de cubiertas antrópicas como asfaltos hasta edificaciones. Cuando las capas más profundas se licuan, las capas superficiales antrópicas se mueven lateralmente en bloques, tanto durante como después del sismo. Lo anterior provoca una deformación permanente del suelo y ruptura de las cubiertas antrópicas (Figura 3c, d y e). La magnitud de los desplazamientos horizontales registrados durante los sismos históricos fue, en general, del orden de metros y las capas de suelos desplazados

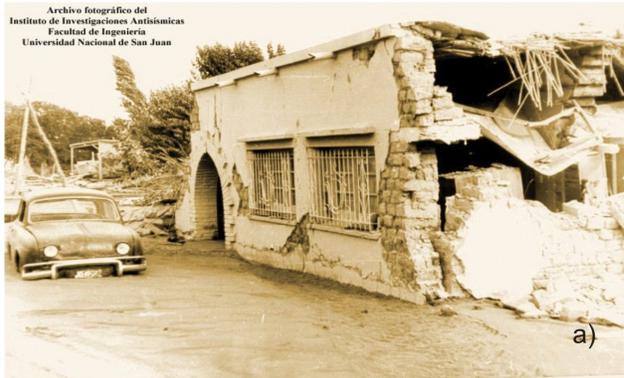


Figura 3 a) Vehículo afectado por la licuación de suelos durante el terremoto de 1977. Tomado de Instituto de Investigaciones Antisísmicas (IDIA, 1977). b) Reducción de la capacidad de soporte de los cimientos debido al debilitamiento del material del suelo subyacente o colindante durante el terremoto de 1977. Tomado de Instituto de Investigaciones Antisísmicas (IDIA, 1977). c) Efectos de propagación lateral de suelos en el sur de la provincia de San Juan, a más de 100 km de distancia del epicentro del sismo de Caucete. Tomado de Volponi *et al.* (1978). d) Roturas en el revestimiento de un canal de riego, por propagación lateral durante el terremoto de 1977. Tomado de INPRES (1977). e) Grieta formada durante el sismo de 1894 al norte de la ciudad de San Juan. Fuente: Bodenbender (1894). f) Agrietamiento y propagación lateral en una calle principal de Caucete en el evento de 1977. Tomado de Volponi *et al.* (1978).

presentaron fisuras, fracturas, escarpes, hundimientos además basculamientos de bloques (Figura 3e y 3f).

3. Estructuras de licuación generadas durante los terremotos históricos

El valle del Tulum es una depresión colmada por sedimentos y sedimentitas del Neógeno y Cuaternario que contiene una cuenca de agua subterránea de unos 3700 km² de extensión. Los sedimentos cuaternarios que rellenan la cuenca fueron depositados principalmente por el río San Juan, curso que ha formado un amplio abanico y llanura aluvial (Figuras 1 y 4). Estos sedimentos constituyen el reservorio de agua subterránea de la cuenca del valle de Tulum y poseen espesores variables entre unas decenas de metros hasta 600 a 700 m, albergando acuíferos de tipo libre y confinado. Los principales sismos ocurridos en la provincia de San Juan en 1894, 1944, 1952 y 1977 (Figura 4) ocasionaron licuación de los depósitos de arenas, limos y arcillas de la llanura aluvial y abanico distal del río San Juan, donde el nivel de agua subterránea se encontraba muy cerca de la superficie. Es decir, en este sector se produjeron aceleraciones del terreno significativamente mayores que en el área correspondiente al sector apical del abanico aluvial del mismo río, donde predominan las gravas y el agua subterránea se encuentra a mayor profundidad (Perucca y Bastías, 2005).

Obermeier y Pond (1999) determinaron que los tipos de estructuras de licuación superficiales más comunes corresponden a cráteres de arena por explosión, volcanes de arena, asentamientos diferenciales y grietas. Estas estructuras fueron ampliamente identificadas en el área de estudio:

i) El terremoto del 27 de octubre de 1894, conocido como “Terremoto Argentino”, es el sismo de mayor magnitud ocurrido en Argentina. A dicho sismo se le asignó una magnitud Ms 8.2 (Bodenbender, 1894) y profundidad de 30 km (INPRES, 2006), la intensidad máxima de IX en

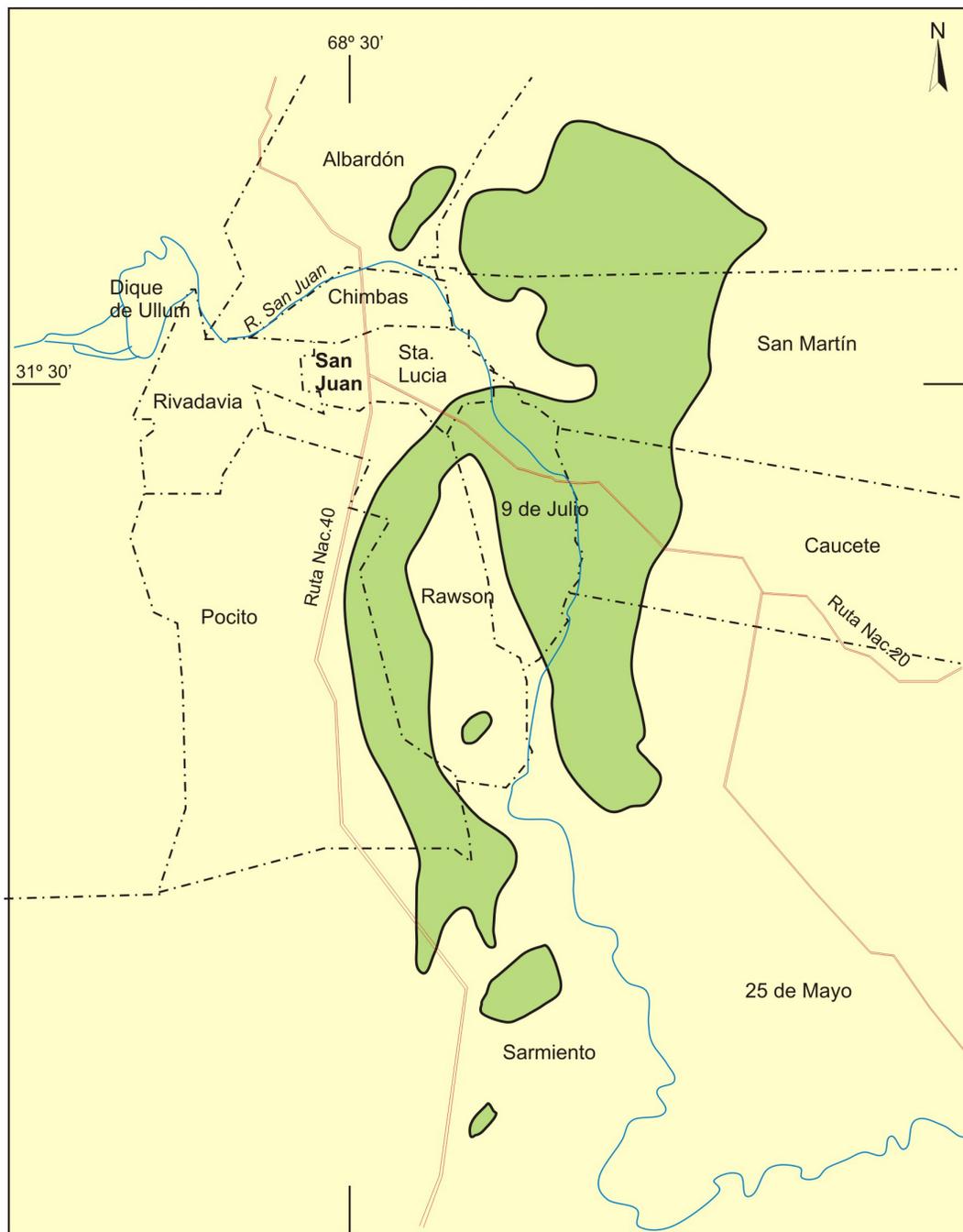
la Escala Mercalli Modificada (EMM) y epicentro en el noroeste de la provincia de San Juan (Figura 2). Algunas características peculiares de este sismo fueron los efectos secundarios como la licuación de suelos (grietas, volcanes de arena y salidas de agua en forma de chorros de hasta 2 m) en áreas muy alejadas del epicentro (>200 km). Bodenbender (1894) describió para este evento numerosas grietas de hasta 1.5 m de ancho, con emanaciones de agua y arena, además de cráteres y volcanes de arena (Figura 5a).

Los trabajos de campo realizados inmediatamente después del sismo no identificaron la ruptura superficial asociada a la falla sismogénica. Sin embargo, gracias a evidencias secundarias como cráteres, volcanes de arena y grietas se pudo obtener información valiosa de las características del sismo y se determinó en forma aproximada su epicentro (Perucca *et al.*, 2006).

ii) El terremoto del 15 de enero de 1944 es considerado el evento más destructivo que se haya registrado en el país, con una magnitud Mw 7.0 (Alvarado y Beck, 2006) e intensidad IX (EMM), siendo el epicentro la localidad de La Laja, en el departamento Albardón, al Norte del río San Juan (Figura 2). Este evento destructivo fue la base de los estudios posteriores para el control urbanístico, la planificación territorial y la prevención de catástrofes, inexistentes hasta ese momento en Argentina. Según los relatos de los pobladores y diarios locales, algunas estructuras efímeras generadas por este sismo fueron las grietas, de las cuales emanó abundante agua que alcanzó 60 cm de altura y ocasionó inundaciones locales (Figura 5a).

Este fenómeno duró pocas horas y al día siguiente del sismo la mayor parte de las grietas estaban secas. Al noreste de la zona de estudio se formaron conos de arena o de barro generalmente alineados sobre una grieta, aunque también aislados sin conexión con grieta alguna. Es de destacar que en varios sectores al Norte del río San Juan, el agua subterránea que estaba en ese momento a 40 m de profundidad pasó a ser surgente y pocos días después volvió a su condición original (INPRES, 1977).

ÁREA SUSCEPTIBLE DE LICUEFACCIÓN EN EL VALLE DEL TULUM



Área susceptible a licuefacción (nivel de freática < 3m)



LPP/ EM

Figura 4 Principales áreas en el valle del Tulum que sufrieron licuación de suelos durante los sismos históricos ocurridos en la provincia de San Juan y que son susceptibles de sufrir licuación en eventos sísmicos futuros. Tomado de Perucca y Bastias (2005).

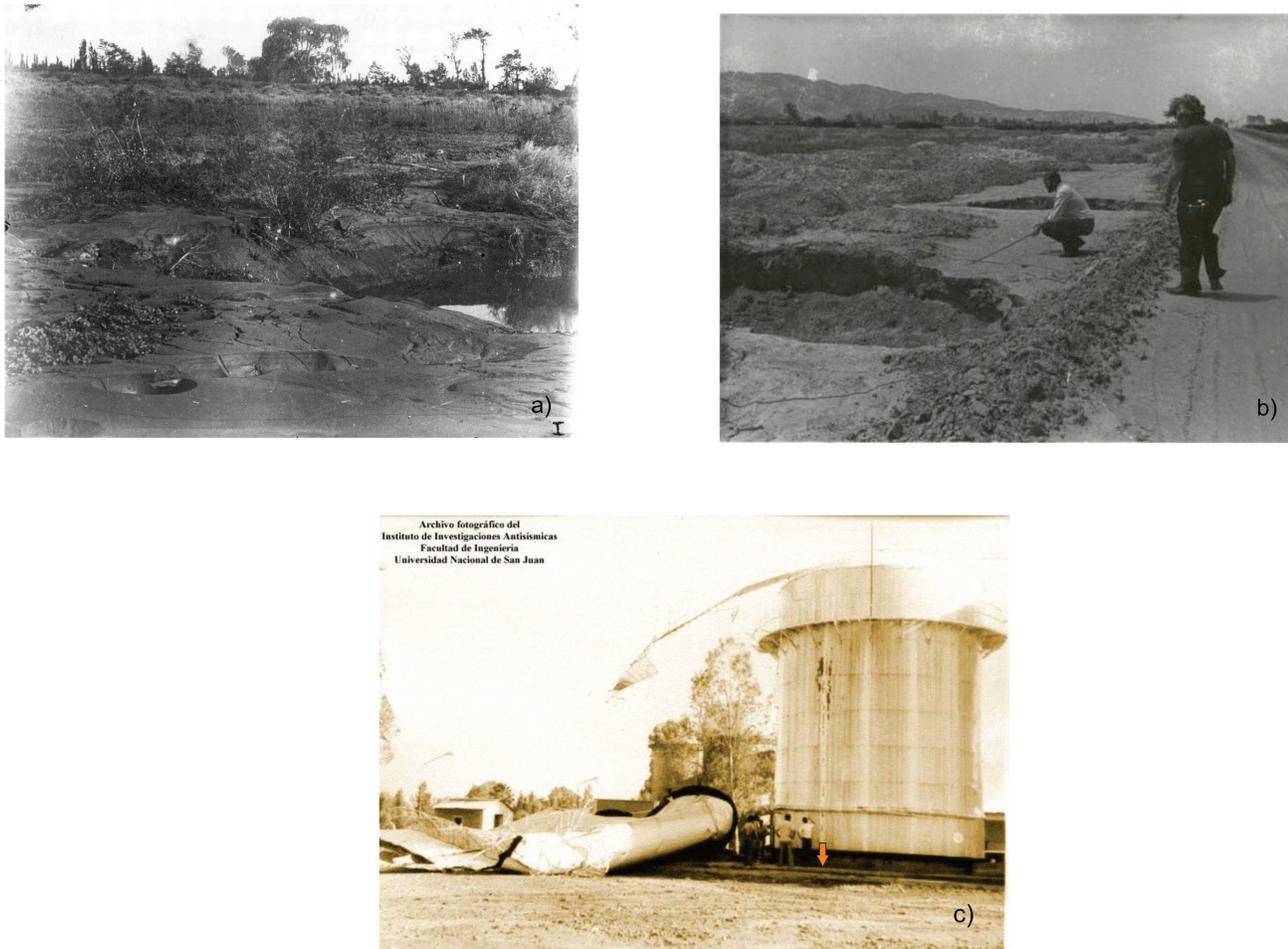


Figura 5 a) Cráteres y volcanes de arena en el departamento Albardón durante el terremoto del 27 de octubre de 1894. Tomado de Bodenbender (1894). b) Cráter de arena con hundimiento de 1.5 m en el terremoto del 23 de noviembre de 1977 en San Martín. Tomado de INPRES (1977). c) Cráter y asentamiento alrededor de los tanques con vino en el sismo terremoto del 23 de noviembre de 1977. Tomado de Instituto de Investigaciones Antisísmicas (IDIA, 1977).

iii) El terremoto ocurrido en San Juan el 11 de junio de 1952 registró una intensidad de VIII (EMM), magnitud (Ms) 6.8 y su epicentro fue a los $31^{\circ}36'0''$ S y $68^{\circ}35'59''$ O (Figura 2), a una profundidad de 12 km (Alvarado y Beck, 2006). Este sismo causó daños en varias localidades del Sur y Oeste de la provincia, hubo dos muertes por derrumbes y varios heridos. Se registraron numerosas estructuras de licuación, principalmente en el valle de Zonda (Perucca *et al.*, 2006).

iv) El terremoto del 23 de noviembre de 1977 fue de larga duración y afectó prácticamente a toda la región centro-oeste de Argentina. Este movimiento se generó por un mecanismo de evento múltiple, ya que ocurrieron dos terremotos

siendo el primero disparador del segundo. El primer evento fue de magnitud Ms 6.6 y segundos más tarde se produjo el terremoto principal de magnitud Ms 7.5 e intensidad IX (MM) (INPRES, 1982). Este evento generó licuación de suelos (Figura 5b) hasta al menos 260 km de distancia del epicentro, el cual se ubicó al sureste de la sierra de Pie de Palo (Figura 2). Produjo daños importantes en viviendas, edificios escolares y considerable destrucción en los establecimientos agroindustriales (principalmente en la industria vitivinícola) (Figura 5c).

Los efectos de la licuación de suelos más característicos fueron la pérdida parcial de capacidad portante en fundaciones y asentamientos

(algunos suficientes para hacer colapsar estructuras), numerosos deslizamientos y hundimientos de terraplenes de rutas y vías ferroviarias, grietas en el terreno y volcanes de arena. Uno de los efectos que causó serios inconvenientes fue la disipación posterior de las presiones de poros por el movimiento sísmico, como volcanes de arena y grietas con eyección hacia la superficie con la anegación de los suelos. Finalizado el movimiento sísmico del 23 de noviembre de 1977, aparecieron grietas en el terreno con eyección de agua-arena, proceso que continuó por varios minutos (Fiore *et al.*, 1994). Se identificaron además, conos de arena alineados a lo largo de 300 y 500 m, con diámetros desde pocos centímetros hasta 0.8 m y alturas de hasta 50 cm (INPRES, 1977). Estos conos de arena arrojaron materiales de distintos tipos, granulometría y color, resultado de la composición heterogénea de los suelos. También se describieron, en algunos sectores, cráteres de arena con hundimiento de hasta 1.5 m.

Se observaron grietas en el terreno con posterior eyección de agua y arena, para estratos que licuaron a profundidades de más de 4 m y donde los suelos suprayacentes eran generalmente cohesivos; característica importante observada cercana al epicentro (Figura 2). En el departamento San Martín se reconocieron volcanes de arena en suelos incoherentes. Se originó un flujo generalizado de agua hacia la superficie y posterior anegamiento en suelos arenosos y con el nivel freático a 1 m de profundidad. Este proceso tuvo una amplia manifestación en algunos campos cultivados, donde se produjeron inundaciones y asentamientos del orden de 50 cm (INPRES, 1977). También se mencionaron asentamientos en superficies del orden de 10 a 30 cm, sin flujo de agua-arena hacia el exterior y deformaciones por distorsión de lentes o bolsones de suelos arenosos inmersos en una masa de suelos arcillosos o limo-arcillosos de muy baja permeabilidad, que se comportan prácticamente como fronteras impermeables. Cuando se presentó este caso, bajo construcciones como viviendas y edificios se dieron asentamientos

significativos de 5 a 12 cm de sus fundaciones, sin llegar al colapso estructural. También se generaron importantes asentamientos alrededor de los tanques con vino de algunas bodegas (INPRES, 1977) (Figura 5c).

Se describieron, además, grietas con eyección de agua-arena en la superficie del suelo como las que afectaron a viviendas en Caucete (Figura 6a, b y c). Allí se desarrolló una grieta de 200 m de extensión y anchos variables entre 2.5 a 10 cm. Los efectos de la licuación manifiestos en todos los terremotos mencionados como grietas, cráteres y volcanes de arena fueron numerosos y muchos de ellos desaparecieron rápidamente, siendo el denominador común de estas estructuras el tiempo efímero de conservación.

4. Propuesta metodológica para el tratamiento del patrimonio efímero

Actualmente, no se ha realizado en Argentina ninguna guía de campo que se refiera al levantamiento de las estructuras de licuación *in situ*, teniendo en cuenta su carácter temporal para valorarlas como un patrimonio efímero. Solamente se cuenta con registros aislados, relatos de pobladores, diarios, etc., sin una ubicación precisa de los mismos. A los fines de efectuar un levantamiento sistemático de estas estructuras, se proponen los siguientes procedimientos divididos en 3 etapas:

ETAPA I

Recopilación bibliográfica: Se recomienda contar con recopilación de la mayor información posible, particularmente datos históricos, ya que se ha comprobado que estos procesos pueden reiterarse en los mismos sitios en eventos futuros. Esto fue comprobado por Audemard y De Santis (1991) en 1989, en el norte de Venezuela, con dos eventos de magnitud 5.7 y 5.0 ocurridos con diferencia de cuatro días, los cuales produjeron numerosos efectos de licuación en los mismos sectores.



Figura 6 a) Volcanes de arena en el interior de una vivienda en Caucete. Terremoto del 23 de noviembre de 1977. b) Vista aérea de volcanes de arena alineados a lo largo de una falla o zona de debilidad. Terremoto del 23 de noviembre de 1977. Tomado de INPRES (1977). c) Volcanes de arena en el interior de una vivienda en Caucete. Terremoto del 23 de noviembre de 1977. Tomado de Volponi *et al.* (1978). d) Detalle de volcanes de arena formados durante el terremoto de 1977. Tomado de INPRES (1977).

ETAPA II

Entrevistas a Testigos: Las entrevistas a los pobladores son muy valiosas, ya que permiten diferenciar los efectos reales del evento, es decir informan de las condiciones anteriores y posteriores al sismo. Durante las entrevistas se solicitará al entrevistado que relate lo observado (los relatos aportan más información que las preguntas de respuesta sí o no), obviando el lenguaje técnico durante la entrevista. Es importante comparar la información que aportan los testigos, con los datos de la prensa local (horas del sismo, tiempo de salida del flujo de agua a la superficie después de las sacudidas del sismo, ruidos, dirección de aproximación de las ondas etc.).

ETAPA III

Con los datos relevados se elabora un informe preliminar con los resultados obtenidos, conclusiones y recomendaciones para futuros eventos. Los informes se remitirán a las instituciones pertinentes o serán presentados en reuniones internacionales y/o simposios.

5. Discusión y conclusiones

Tal como se mencionara anteriormente, la zona más susceptible a sufrir licuación en la provincia de San Juan es el sector ubicado en la porción distal del abanico y llanura aluvial del río San Juan,

en los que se asienta la población. Por ello, aun cuando se construya bajo normas de edificación sísmo resistente, la ausencia de estudios de los suelos de la región y de levantamientos sistemáticos de las estructuras de licuación registradas durante eventos sísmicos históricos, puede provocar grandes pérdidas económicas, no sólo en las edificaciones sino también en las comunicaciones, pozos de agua, caminos, gasoductos, líneas eléctricas, etc.

Por otra parte, si bien se conocen numerosos casos internacionales en los que sismos de magnitud 7 y 8 han originado licuación a más de 150 km del epicentro (Youd y Perkins, 1978), en nuestra provincia los sismos registrados en épocas históricas (como los de 1894, 1944 y 1977, con magnitudes entre 7.0 y 8.2) la han producido a distancias de más de 250 km de sus epicentros (Bodenbender, 1894; INPRES, 1977). Las condiciones físicas del terreno y la existencia de un nivel freático poco profundo son factores de amplificación local y reafirman la necesidad de efectuar inventarios y otros estudios de detalle en el área del valle de Tulum y en otras regiones del país cuyas ciudades se encuentran en áreas con características del terreno semejantes.

Muchos terremotos de moderada a elevada magnitud han producido licuación de suelos en todo el mundo. Por ejemplo, el terremoto de Niigata (Japón, 1964), el de Loma Prieta (San Francisco, 1989), el de Golcuk (Turquía, 1999), el de Japón (2011) y el ocurrido recientemente en Celebes (Indonesia, 2018), entre otros. Estos procesos han causado graves daños en la infraestructura y ocasionado numerosas víctimas y elevadas pérdidas económicas. Debido a esto, son necesarios estudios diversos con el objeto de medir distintas propiedades del suelo como: periodo fundamental, profundidad a basamento, medición de potencial de licuación, verificación de comportamiento de sitio ante eventos sísmicos destructivos, determinación de los periodos de vibración de edificios, medición de factor de amplificación del suelo, etc. Sin embargo, son escasos los estudios con las características expuestas en este trabajo, que sin duda resultarían expeditivos y relativamente

económicos y fáciles de aplicar en todas partes del mundo. Es así que el estudio de las estructuras generadas por licuación y su relevamiento *in situ* es una disciplina totalmente nueva en Argentina y muy poco conocida en el mundo, por lo que se propone abrir nuevas disciplinas de investigación.

Las pautas elaboradas constituyen una base para confeccionar una guía de campo definitiva, que a la vez permita adoptar una política de cooperación con todas las instituciones involucradas y determinar aquellas áreas susceptibles a licuación en caso de eventos sísmicos futuros. Youd (1984) señaló que en eventos sísmicos donde se ha presentado licuación de suelos, existe una alta posibilidad de la recurrencia del proceso en una misma zona.

Es decir, que la licuación puede repetirse cuando las condiciones del suelo, así como los niveles freáticos, permanecen iguales o con características semejantes. Por lo que el proceso se repetirá en los mismos lugares hasta que la compactación del terreno se haya completado. El inventario de estas estructuras, de carácter efímero, permitirá crear una base de datos georreferenciada para la ubicación a nivel local y regional de suelos susceptibles a sufrir licuación ante sismos de moderada a elevada magnitud.

Por otra parte, con estas pautas generales de tratamiento del patrimonio efímero se podrán establecer procedimientos y guías uniformes para normalizar el relevamiento, los parámetros a medir, la difusión y disponibilidad de los datos a través de los organismos competentes. Finalmente, se podrá aplicar el mismo procedimiento a otras regiones igualmente sísmicas y con características geológicas similares. Se pretende que las pautas generales indicadas en este trabajo puedan ser útiles a las autoridades y a la comunidad científica en lo referente a la amenaza sísmica.

Agradecimientos

La presente contribución fue financiada con fondos del Programa Permanente del Gabinete de Neotectónica y Geomorfología, Instituto de

Investigaciones Geológicas de la Universidad Nacional de San Juan. Las autoras agradecen a los revisores por sus sugerencias y comentarios que contribuyeron a mejorar este trabajo.

Referencias

- Alvarado, P., Beck, S., 2006, Source characterization of the San Juan (Argentina) crustal earthquakes of 15 January 1944 (Mw 7.0) and 11 June 1952 (Mw 6.8): *Earth and Planetary Science Letters*, 243 (3–4), 615–631. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.01.015>
- Ambraseys, N., 1988, Engineering seismology: earthquake engineering and structural dynamics: *Journal of the International Association of Earthquake Engineering*, 17, 1–105.
- Audemard, F.A., De Santis, F., 1991, Survey of liquefaction structures induced by recent moderate earthquakes: *Bulletin International Association Engineering Geology* 44(1), 5–16. <https://doi.org/10.1007/bf02602705>
- Bodenbender, G., 1894, El terremoto argentino del 27 de octubre de 1894: *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias en Córdoba XIV*, 293–329.
- Carcavilla, L., López-Martínez, J., Durán, J.J., 2007, Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos: Instituto Geológico y Minero de España, Serie Cuadernos del Museo Geominero 7, Madrid, 360 p.
- Castilla, R., Audemard, F.A., 2007, Sand blows as a potential tool for magnitude estimation of pre-instrumental earthquakes: *Journal of Seismology* 11(4), 473–487. <https://doi.org/10.1007/s10950-007-9065-z>
- Díez-Herrero, A., Ortega, J.A., Pérez-López, R., Rodríguez-Pascua, M.A., 2011, Patrimonio geológico efímero: Singularidades de su estudio y gestión. Avances y retos en la conservación del patrimonio geológico en España, *Actas de la IX Reunión Nacional de la Comisión de Patrimonio Geológico*. Sociedad Geológica de España, Universidad de León, 346 p.
- Fiore, J.M., Castro, A.D., Morandi, J.O., 1994, Caracterización Dinámica de Suelos del Gran San Juan, IMS-UNSJ.
- Galli, P., 2000, New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction, *Tectonophysics* 324(3), 169–187. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00118-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00118-9)
- Instituto de Investigaciones Antisísmicas (IDIA), 1977, Archivo fotográfico. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de San Juan.
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES), 1977, El Terremoto de San Juan del 23 de noviembre de 1977, Informe Preliminar, 102 p.
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES), 1982, Microzonificación sísmica del valle de Tulum. Provincia de San Juan, Informe Técnico General II, 50 p.
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES), 2006, Listado de terremotos históricos, catálogo on-line (<http://contenidos.inpres.gov.ar/sismologia/historicos>).
- Kuribayashi, E., Tatsuoka, F., 1975, Brief review of liquefaction during earthquakes in Japan: *Soils and Foundations: Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering* 15, 81–91.
- Mörner, N.A., Audemard, F.A., Bronge, C., Dawson, S., Grant, D., Kvamsdal, O., Nikonov, A., Sidén, A., Sjöberg, R., Strandth, L., Sun, G., Tröften, P-E., Wigren, H., Zykoy, D., 2003, The Hudisksvall area: the Boda Cave and its surroundings, the 9663 BP paleoseismic event, *en* Mörner, N-A.

- (ed.), Paleoseismicity of Sweden: a novel paradigm. JOFO Grafiska AB, Stockholm, Sweden, 29–224.
- Obermeier, S.F., Pond, E.C., 1999, Issues in using liquefaction features for paleoseismic analysis: *Seismological Research Letters* 70(1), 34–58. <https://doi.org/10.1785/gssrl.70.1.34>
- Palacios, S., Perucca, P., Pantano, A., Lara, G., 2017, Propuesta metodológica para el análisis de la licuefacción de suelos asociada a sismos destructivos. Pre- Andes centrales. Argentina (31° 30' S y 68° 25' O): *Anuário do Instituto de Geociencias*, 40, 55–69.
- Papadopoulos, G.A., Lefkopoulos, G., 1993, Magnitude, distance relations for liquefaction in soil from earthquakes: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(3), 925–938.
- Perucca, L., Bastías, H., 2005, El Terremoto Argentino de 1894: Fenómenos de Licuefacción asociados a Sismos, *INSUGEO, Serie Correlación Geológica*, 19, 55–70.
- Perucca, L., Pérez, M., Navarro, C., 2006, Fenómenos de licuefacción asociados a terremotos históricos. Su análisis en la evaluación del peligro sísmico en la Argentina: *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61, 567–578.
- Ramos, V., Vujovich, G., 2000, Hoja geológica 3169–IV San Juan, 2000. Escala 1:250.000, de la Secretaría de Minería-Servicio Geológico Minero Argentino (Instituto de Geología y Recursos Minerales): Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina 243, Buenos Aires, 82 p.
- Real Academia Española (RAE), 2001, *Diccionario de la lengua española* (22a ed.): Madrid, España, disponible en < <https://www.rae.es/>>, consultado el 23 de septiembre de 2019.
- Rodríguez-Pascua, M., 1997, Paleosismicidad en Emplazamientos Nucleares. Estudio en Relación con el Cálculo de Peligrosidad Sísmica, *Colección Otros Documentos*, Consejo de Seguridad Nuclear, Madrid, 286 p.
- Volponi, F., Quiroga, M., Robles, A., 1978, El terremoto de Caucete del 23 de noviembre de 1977: Instituto Sismológico Zonda, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, 81 p.
- Youd, T.L., 1984, Recurrences of Liquefaction at Same Site, *Proceedings, 8th World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, 3, 231–238.
- Youd, T.L., Keefer, D.K., 1978, Liquefaction and landslides in the November 23, 1977 earthquake in San Juan, Argentina: Abstracts Program, 91 st. Annual Meeting Geological Society of America, 10, 521p.
- Youd, T.L., Perkins, D.M., 1978, Mapping of liquefaction induced ground failure potential: *Journal of Geotechnical Engineering*, Div., ASCE 104, 433–446.