

# Manifestaciones de subsidencia superficial en el Pastal, Norte de Mendoza, Argentina

**Francisco Mingorance<sup>1</sup>**

## **RESUMEN**

La subsidencia del terreno debida a la declinación del nivel de agua subterránea, un peligro geológico ampliamente distribuido, es el proceso que ha causado la más costosa y severa subsidencia a nivel mundial.

La causa principal de subsidencia del terreno en El Pastal (norte de Mendoza), es la compactación de sedimentos de grano fino en el acuífero que ha soportado la extracción de agua subterránea por un largo período de tiempo, probablemente con un ritmo de extracción mayor que el de recarga.

El terremoto de Cauce de 1977 (Ms: 7.4), el cual gatilló una extensiva licuefacción de suelos y extensionamiento lateral en El Pastal, alteró localmente las condiciones hidrogeológicas del acuífero.

Los sedimentos granulares sueltos presentes en dicha área son altamente susceptibles a la subsidencia del terreno (extracción de agua subterránea - hidrocompactación - piping) y a la licuefacción de suelos.

## **PALABRAS CLAVE**

Geología Ambiental - Peligros Geológicos - Subsidencia Superficial - Extracción de Agua Subterránea - Licuefacción de Suelos - Terremoto de Cauce de (1977) - El Pastal - Mendoza.

## **SUMMARY**

Land subsidence due to water level decline, a widespread geologic hazard, is the process that has caused the most costly and severe subsidence in the world.

The primary cause of land subsidence in the El Pastal area (northern Mendoza) is the compaction of fine-grained sediments in the aquifer system following severe, long-term withdrawal of ground water, probably in excess of recharge.

The 1977 Cauce Earthquake (Ms: 7.4), which caused extensive soil liquefaction and lateral spreading at El Pastal, locally altered the hydrological conditions of the aquifer system.

The loose granular sediments present in this area are highly susceptible to land subsidence (ground-water withdrawal - hydrocompaction - piping) and soil liquefaction.

---

<sup>1</sup> M. Sc., integrante del Laboratorio de Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina  
E-mail: jshinken@raiz.uncu.edu.ar

## KEY WORDS

Environmental Geology – Geologic Hazards – Shallow Subsidence – Ground-Water Withdrawal – Soil Liquefaction – 1977 Cauce Earthquake – El Pastal – Mendoza.

## INTRODUCCIÓN

La subsidencia, el hundimiento de la superficie del terreno como consecuencia de cambios ocurridos en profundidad, es un proceso generalmente lento que ha sido la causa directa de cuantiosas pérdidas materiales ocurridas en distintos sitios del mundo.

Dado que existe una componente natural en su ocurrencia, este fenómeno es considerado como un verdadero peligro geológico, el cual se ve generalmente acelerado por actividades humanas inapropiadas. Entre las causas más comunes de subsidencia del terreno relacionada a la actividad del hombre, se destacan: extracción de agua subterránea, petróleo y gas de reservorios subterráneos, disolución de rocas calizas y sales, colapso de minas subterráneas, drenaje de suelos orgánicos, humedecimiento inicial de suelos áridos (Hidrocompactación) y desarrollo de cañerías subterráneas en materiales geológicamente susceptibles (Piping).

La falta de registros o la ausencia de un catálogo de eventos cuantificado y documentado, no indica que Argentina sea una excepción a la ocurrencia de esta clase de peligro geológico. En calidad de ejemplo, es importante destacar que procesos de subsidencia del terreno tienen lugar en los 50 estados de los Estados Unidos (1).

La subsidencia se puede clasificar, en función de la profundidad de ocurrencia del mecanismo causativo, en:

1. Subsidencia Profunda
2. Subsidencia Superficial

La primera ocurre a una profundidad variable entre varios centenares de metros hasta unos pocos kilómetros, y está fundamentalmente asociada a la extracción de petróleo y gas. La subsidencia superficial, por otro lado, tiene lugar cerca de la superficie del terreno, generalmente entre algunas decenas y unos pocos cientos de metros de profundidad. Esta última clase está relacionada a diversos mecanismos de generación, entre los que se destacan extracción de agua subterránea, hidrocompactación, disolución de rocas o sales, oxidación de materia orgánica y actividad minera.

La subsidencia causada por la extracción de fluidos es un problema muy extendido, que puede afectar tanto a la circulación de fluidos como a la distribución de sedimentos en y debajo de la superficie del terreno (2, 3).

En la tabla 1 se presentan los diferentes tipos de subsidencia ordenados según su mecanismo de generación, profundidad de ocurrencia y extensión del fenómeno. Los registros máximos indicados pertenecen fundamentalmente a los Estados Unidos, algunos de los cuales son registros máximos mundiales.

MECANISMO	CLASIFICACIÓN	EXTENSIÓN	REGISTROS MÁXIMOS
Extracción de Agua	Superficial	Local - Zonal	9 m en 52 años – California (RM)
Extracción de Petróleo	Profunda	Zonal	8.7 m en 44 años – California (RM)
Hidrocompactación	Superficial	Local	1 – 4.5 m en horas / días - California
Actividad Minera	Superficial	Local	34.5 m en horas - Ohio
Disoluciones	Superficial	Local	34 m en 48 horas - Texas

Tabla 1: Tipos de subsidencia (RM : Registro máximo a escala mundial).

Fuentes : Alfors et al, 1973; Castle y Yerkes, 1976; Poland, 1984; Ireland, 1986; Newton, 1987; Johnson, 1991; Crowell, 1997

Desde el punto de vista del mecanismo causativo de la subsidencia del terreno, podemos subdividirla en los siguientes tipos:

- Subsidencia por extracción de agua subterránea
- Subsidencia por extracción de petróleo o gas
- Subsidencia por hidrocompactación
- Subsidencia por disolución de rocas o sales
- Subsidencia por actividad minera.

En las regiones sísmicas, por otro lado, la licuefacción de suelos constituye otra forma de subsidencia. Esta ocurre súbitamente gatillada por el sacudimiento sísmico del terreno, en condiciones geológicas e hidrogeológicas muy particulares.

Dado que la licuefacción produce innumerables pérdidas materiales durante la ocurrencia de terremotos de magnitudes medias a altas, este peligro geológico secundario asociado a terremotos fue históricamente analizado desde el punto de vista de los efectos geológicos superficiales que produce sobre las estructuras ingenieriles, pero nunca ha sido tratado como un posible iniciador de subsidencia múltiple a mediano o largo plazo.

Si bien el valle de San Joaquín (California) es el sitio del planeta que ha experimentado la mayor subsidencia por extracción de agua subterránea (9 m en 52 años : 1, 2, 3) y por consiguiente unos de los sectores mejor estudiados del mundo en este aspecto, no se conoce realmente si la licuefacción de suelos (superficial y/o subsuperficial) asociada a terremotos históricos pudo haber contribuido al desarrollo de piping, como así también haber afectado o alterado las condiciones hidrogeológicas de los acuíferos explotados.

En El Pastal, una zona agrícola localizada a unos 15 km al NE de la ciudad capital de la provincia, se han identificado evidencias de subsidencia local en dos sectores muy cercanos entre sí, los cuales tienen relación con la explotación del agua subterránea y con la licuefacción de suelos asociada al terremoto de Cauçete (1977).

En el primer caso, las manifestaciones de subsidencia superficial están expresadas por el hundimiento casi circular alrededor de la bomba de extracción de agua de dos pozos en actividad (hasta el momento de ocurrir la subsidencia), cuya profundidad de explotación del acuífero era de unos 87 m.

Por otro lado, esta zona experimentó una severa licuefacción de suelos (Superficial y Subsuperficial) asociada al terremoto de Cauçete de 1977 (Ms: 7.4), la cual se manifestó fundamentalmente por un significativo agrietamiento superficial del terreno (4), proceso científicamente conocido como expansión o extensionamiento lateral (Lateral Spreading), además del hundimiento diferencial localizado (licuefacción superficial) de las piletas de almacenamiento de vino de una pequeña bodega local.

La tarea de extracción de agua subterránea realizada mediante estas perforaciones se vio afectada por el elevado nivel de sacudimiento sísmico del terreno producido por el terremoto de 1977, el cual generó una disminución prácticamente instantánea del flujo de agua, además de la expulsión de material sólido a la superficie (limo arenoso). Esta alteración de las condiciones hidrogeológicas del acuífero, requirió la realización de trabajos posteriores tendientes a recomponer la situación extractiva inicial.

El terremoto de Mendoza de 1985 (Ms: 5.9), en contraposición a lo ocurrido en 1977 (Terremoto de Cauçete), no produjo licuefacción de suelos en El Pastal (5) ni afectó la extracción de agua subterránea realizada por los pozos señalados.

## **CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE SUBSIDENCIA**

Las principales características de los diferentes tipos de subsidencia serán tratadas brevemente, con

el objeto de destacar sus diferencias más salientes, en lo que respecta fundamentalmente a su mecanismo de generación, extensión del fenómeno, condiciones geológicas necesarias para su ocurrencia y registros máximos conocidos.

La subsidencia relacionada a la oxidación de suelos orgánicos no será tratada en este trabajo, ya que la misma requiere condiciones geológicas, hidrogeológicas y biológicas muy particulares (deltas de los grandes ríos), las cuales no tienen posibilidad de ocurrencia en esta región del oeste de Argentina.

### **Subsidencia por extracción de agua subterránea**

Este mecanismo de subsidencia es el más extendido, severo y costoso a nivel mundial. El bombeo del fluido, desde una profundidad determinada hacia el exterior, reduce la presión de poros que ayuda a soportar los depósitos sobreyacentes. El material sedimentario remanente se acomodará compactándose en un volumen menor, en respuesta al incremento de esfuerzos, lo cual producirá un efecto irreversible (2, 3). La causa principal de subsidencia es, por lo tanto, la compactación de sedimentos de grano fino (fundamentalmente arcillas) en el sistema de acuífero sometido a una severa extracción por un largo período de tiempo, en donde el ritmo de extracción excede al de recarga.

La cantidad de subsidencia en un área dada está relacionada directamente a la magnitud de la declinación del nivel de agua, al porcentaje de estratos arcillosos constituyentes del acuífero y al período de tiempo durante el cual dicha declinación fue mantenida (6, 7).

Este tipo de subsidencia afecta generalmente amplias áreas [14.000 km<sup>2</sup> en el valle de San Joaquín - (1)], con la excepción de los efectos superficiales locales que produce sobre los pozos de extracción de agua. En este último caso, los daños ocurridos tienen la forma de colapso telescópico del revestimiento del pozo y algunas veces la exposición del referido revestimiento sobre la superficie del terreno (6).

El caso más severo a nivel mundial lo constituye, sin lugar a dudas, el valle de San Joaquín (California), el cual sufre subsidencia desde la década del 20. El registro máximo correspondió al período 1925 - 1977, alcanzando un valor de 9 m (2, 3 y 8).

Un efecto geológico superficial asociado a subsidencia de regiones sometidas a una sobreexplotación prolongada de acuíferos, tal como ocurre en el SW de los Estados Unidos, es la formación de profundas grietas en la superficie del terreno. Una de estas grietas alcanzó una profundidad de aproximadamente 30 m y una longitud extraordinaria de 16 km en Arizona central.

### **Subsidencia por extracción de petróleo y gas**

Este proceso de subsidencia ocurre casi de la misma manera que aquel relacionado a la extracción de agua. La presión de poros es reducida por extracción de fluidos, mientras que la carga de la roca sobreyacente es gradualmente transferida a las rocas del reservorio (principalmente estratos de arcillas y pizarras), produciendo su compactación (6).

El hundimiento diferencial es el efecto superficial más común relacionado a este proceso, el cual tiene origen prácticamente en el centro del Área de Producción, adquiriendo una forma similar a una cubeta poco profunda (6, 9).

El agrietamiento de la superficie del terreno, en respuesta al hundimiento diferencial, es un efecto superficial poco observado en el mundo, siendo el más conocido aquel ocurrido en 1963 en California, el cual causó (indirectamente) la destrucción de la presa de tierra del reservorio de agua Baldwin Hills (9).

El ejemplo más dramático de subsidencia relacionada a la extracción de petróleo ha tenido lugar en Wilmington, en las cercanías de Long Beach, en donde se alcanzó el máximo registro mundial (8.7 m) para el período 1928 - 1972 (6).

Valores más comunes de subsidencia, para un período de tiempo aproximadamente similar al anterior, son comparables al registrado en Baldwin Hills (California) el cual alcanzó un máximo de 1.5 m entre 1911 y 1964 (9).

La subsidencia relacionada exclusivamente a la extracción de gas, aparentemente no alcanza magnitudes comparables a aquella asociada a la extracción de petróleo. Esta podría ser la razón por la cual dicho proceso de subsidencia no es ampliamente conocido (6).

### **Subsidencia por hidrocompactación**

Este proceso es causado por la saturación rápida de depósitos finos y pobremente compactados, en estado inicial no saturado. La adición de agua facilita la reorientación de las partículas del suelo, produciendo una neta reducción en volumen. En este contexto, los suelos pierden su capacidad de soporte y consolidan bajo su propio peso.

Este proceso, el cual ocurre por encima de la zona de saturación, es muy común en ambientes desérticos, aunque también hay algunos registros en regiones semiáridas (6).

Los materiales más susceptibles a la hidrocompactación son los limos arenosos (entre 0.0039 a 0.0625 mm en diámetro) depositados por acción del viento (Loess) y los depósitos algo arcillosos distales de abanicos aluviales (7).

La saturación de este tipo de depósitos sedimentarios por actividad humana, tal como irrigación, construcción de carreteras y desarrollo de pequeños reservorios superficiales de agua (artificiales), ha contribuido enormemente a la inducción del peligro geológico referido. Se conocen valores máximos variables entre 1 y 4.5 m en los márgenes S y W del valle de San Joaquín (7, 8).

Este proceso está comúnmente relacionado al Piping, el cual contribuye en un incremento lateral y vertical de la subsidencia.

### **Subsidencia por disolución**

Este proceso tiene lugar donde existen rocas sólidas solubles (subsuperficiales), las cuales son disueltas lentamente por el agua natural circulante en o bajo la superficie. El agua de lluvia, en combinación con el CO<sub>2</sub> de la atmósfera, constituye un medio ácido que tiene la propiedad de disolver ciertos tipos de rocas, fundamentalmente las compuestas por carbonatos.

Las principales rocas involucradas en este proceso de disolución, son las calizas (CO<sub>3</sub>Ca) y dolomías ([CO<sub>3</sub>]<sub>2</sub> CaMg), las cuales desarrollan un paisaje característico de disolución denominado Karst. El yeso (SO<sub>4</sub>Ca.2H<sub>2</sub>O), está generalmente presente en el proceso kárstico.

Las geoformas más características de los paisajes kársticos son las cavernas y los sumideros (sinkholes), además de la frecuente disrupción del sistema de drenaje debido a la pérdida de agua superficial y su migración hacia la subsuperficie (10).

Los problemas ambientales en los relieves kársticos se pueden agrupar en dos categorías: la polución del agua subterránea y los problemas ingenieriles de fundación. Entre los últimos, se destacan: asentamiento diferencial, piping (un tipo de erosión subsuperficial) y colapso de la superficie del terreno dentro de las cavidades subterráneas, el cual se conoce como Sumidero de Colapso (10).

El sumidero de colapso se forma casi súbitamente cuando la superficie del terreno colapsa dentro de los vacíos o cavidades subterráneas, produciendo una forma superficial bastante circular, con sus lados o paredes marcadamente abruptas (10,11). Una vez formada, esta manifestación de subsidencia puede incrementar su tamaño.

Si bien el Winter Peak Sinkhole (30 m en 72 horas) ocurrido en Florida (1981) no ha sido el de mayor tamaño y profundidad, fue uno de los que produjo mayores pérdidas materiales hasta el presente (12).

La actividad minera relacionada a la extracción de sal, también puede ser la causa de la generación de sumideros de colapso. De hecho, el Wink Sinkhole ocurrido en Texas fue producido por la disolución de ClNa bajo la superficie del terreno, proceso que duró aproximadamente 48 hs, dejando un hundimiento de unos 110 m de ancho y 34 m de profundidad (11).

### **Subsidencia por actividad minera**

La subsidencia provocada por este mecanismo generalmente afecta a muy pocas personas y tiene un carácter local.

En el contexto de la minería subterránea, este peligro geológico representa al colapso de materiales rocosos consolidados y/o no consolidados, dentro de las galerías subterráneas.

La subsidencia minera es controlada por numerosos factores, entre los que se destacan: espesor del material sobreyacente a la excavación minera, ancho del techo minero no estabilizado con soportes, hidrología, dimensión de los pilares, densidad y dimensión de fracturas y tiempo (13, 14).

La componente vertical de la subsidencia minera es proporcional a la altura del área de extracción (15).

Este proceso es frecuentemente afectado por la circulación de agua o por la fluctuación de su nivel en la mina. De hecho, el agua circulante en una mina subterránea puede deteriorar los soportes del techo o a la roca que lo constituye (13). De la misma manera, la probabilidad de ocurrencia de subsidencia minera se ve incrementada donde las fracturas intersectan al techo de la mina, ya que estas forman verdaderos planos de debilidad que controlarán la ocurrencia del colapso.

Uno de los casos más asombrosos de subsidencia minera se encuentra en el estado de Ohio (USA), en donde la mayoría de las 6.000 minas subterráneas abandonadas son minas de carbón, las cuales han estado provocando problemas de subsidencia al menos desde 1923 (15).

Este proceso ha provocado daños tanto a las fundaciones de edificios, como a cañerías subterráneas y carreteras, además de representar un peligro potencial para el hombre. Recientemente, el colapso sufrido por la carretera interestatal 70 (I - 70) en el condado de Guernsey (Ohio), mantuvo cerrado dicho medio de transporte por varios meses, y produjo un costo total de reparación de unos 3.8 millones de dólares (15).

### **EL EFECTO NEGATIVO DEL PIPING**

Piping es un proceso que conduce a la formación de conductos subterráneos similares a cañerías, debido fundamentalmente a la erosión subsuperficial del suelo por la acción del agua infiltrada. Este proceso puede afectar a materiales con tamaños variables entre los rangos arcillas (< 0.002 mm) y gravas (algunos cm), aunque es más común su desarrollo en suelos con textura fina (arena fina, limo y arcilla).

Las cañerías resultantes son inicialmente de unos pocos centímetros, pero pueden crecer a diámetros mayores a 1 m (10). Su desarrollo está limitado a la cercanía de la superficie, o puede ocasionalmente extenderse varios metros en profundidad.

El piping tiende a acelerarse cuando el nivel de la capa freática se ve notablemente disminuido por la sobreexplotación del agua subterránea, por el incremento de la cantidad de agua infiltrada o por ambos simultáneamente (10). De la misma manera, la acción del hombre puede incrementar la velocidad de ocurrencia del proceso, especialmente si se procede a la canalización de la escorrentía superficial hacia sectores o áreas en donde ocurrirá una infiltración concentrada.

El efecto superficial producido por el piping, el cual es muy similar al causado por hidrocompactación, está fundamentalmente asociado al colapso del techo de las cañerías. Esta última puede ser geoméricamente delineada, en función de la alineación de los colapsos sucesivos.

La elevada peligrosidad potencial del piping radica en que este proceso está generalmente asociado a otros mecanismos de subsidencia (hidrocompactación, extracción de agua subterránea, disolución de rocas y/o sales y actividad minera), lo cual tiende a incrementar la magnitud de la subsidencia inicial (8, 9, 10, 15).

## EVIDENCIAS DE SUBSIDENCIA SUPERFICIAL EN EL PASTAL

La zona agrícola denominada El Pastal se localiza en la Planicie Aluvial de Transición del río Mendoza, y está desarrollada fundamentalmente sobre superficies geomórficas aluviales constituidas por depósitos sedimentarios predominantemente finos.

El espesor del relleno aluvial en esta zona se estima en unos 250 – 270 m, y está compuesto fundamentalmente por depósitos arcillosos, limosos y arenosos finos, intercalados con importantes lentes de gravas (16).

Topográficamente, esta región presenta un relieve aproximadamente plano con una leve pendiente regional hacia el NE.

Desde el punto de vista hidrogeológico, esta zona se caracteriza por presentar (regionalmente) una freática muy superficial (17), la cual no está exenta de sufrir variaciones estacionales y/o anuales (18).

Se observa una elevada contaminación salina de los depósitos superficiales, cuyo origen podría estar relacionado fundamentalmente al ascenso capilar de sales provenientes de una freática salina muy superficial. Estos depósitos superiores muestran además, una importante cementación por  $\text{CO}_3\text{Ca}$ .

Durante la ocurrencia del terremoto de Cauce (1977), y debido a las condiciones geológicas e hidrogeológicas dominantes, se produjo en esta zona la más severa licuefacción de suelos asociada a dicho evento sísmico. Es importante destacar que, a pesar de que el punto de liberación de energía sísmica se localizó a unos 150 km (línea recta) de la zona afectada, el tamaño del evento (Ms: 7.4) y su duración ( $\approx$  1 minuto) fueron críticos al momento de inducir la licuefacción.

La principal manifestación de licuefacción estuvo relacionada a un profundo agrietamiento del terreno (4), lo cual evidencia la ocurrencia de un típico extensionamiento o expansión lateral (Lateral Spreading). Este proceso tiene lugar cuando se produce la licuefacción de un estrato arenoso fino saturado en agua, subsuperficial (unos pocos metros debajo de la superficie) y con una leve inclinación local. Al momento de ocurrir la licuefacción del estrato, este se compacta en forma súbita y fluye prácticamente como un líquido controlado por la pendiente. El depósito suprayacente, por lo tanto, acompaña a la migración produciendo la ruptura del terreno en grandes bloques paralelos, que van rotando relativamente entre sí en el sentido de la extensión. Este proceso ocurrió a unos 3 km del sector afectado por subsidencia reciente.

La otra manifestación de licuefacción estuvo relacionada al hundimiento de dos piletas de almacenamiento de vino de una pequeña bodega local (Figura 4). Estas piletas de hormigón armado, forma prismática y sección rectangular, sufrieron licuefacción de suelos superficial; tal como se evidencia por el hundimiento diferencial de unos 0.30 – 0.40 m. La posible variación lateral del espesor del estrato licuado, además de la diferencia de peso de las estructuras afectadas (cantidad de vino almacenada), provocó un hundimiento relativo mayor de una pileta con respecto a la otra (Figura 4). Este sector se encuentra a unos pocos centenares de metros del sitio mostrado en la Figura 1.

El elevado nivel de sacudimiento sísmico del terreno, amplificado por la naturaleza suelta y la textura fina de los depósitos aluviales presentes en el área bajo estudio, fue responsable de la alteración instantánea (e irreversible) de las condiciones hidrogeológicas del acuífero productivo y/o depósitos sedimentarios inmediatamente superiores e inferiores (posible compactación); generando una súbita y significativa disminución del flujo de agua subterránea (Pozo de Extracción – Figura 1). Esta situación se mantuvo en forma casi definitiva, por lo cual fue necesario realizar trabajos posteriores tendientes a recomponer la situación extractiva inicial. En este sentido, se debió extender la perforación original hasta una profundidad de unos 87m.

El agrietamiento superficial del terreno (0.50 m de profundidad), localizado a unos 25 - 30 m al W-SW del sitio mostrado en la figura 1, representaría la expresión superficial de dicho Asentamiento Diferencial ocurrido en profundidad.

Este último proceso, el cual es característico de zonas afectadas por un elevado shaking del terreno,

puede ser causado por compactación asociada o no a licuefacción (19). Durante el sacudimiento fuerte del terreno los granos del suelo pueden ser reorientados en un paquete sedimentario más denso, debido al colapso de los vacíos y espacios porosos, resultando en una reducción casi instantánea del volumen y espesor total de la columna estratigráfica. El asentamiento diferencial (no asociado a licuefacción) resultante del sacudimiento del terreno generalmente ocurre en sedimentos granulares sueltos o suelos sin cohesión (19).

La ausencia de evidencias de licuefacción superficial y subsuperficial durante el terremoto de 1985 (5), fue consecuencia exclusivamente de la escasa magnitud del evento (Ms: 5.9), ya que las condiciones geológicas e hidrogeológicas aún imperantes indican que esta zona mantiene un elevado potencial futuro para la ocurrencia de licuefacción de suelos.

Con sus nuevas condiciones de extracción, el pozo se mantuvo productivo por aproximadamente 22 años, hasta que en mayo de 1999 ocurrió la subsidencia superficial mostrada en las figuras 1, 2 y 3.

El área bajo estudio fue visitada por primera vez, a solicitud de la Delegación de Defensa Civil del Municipio de Las Heras, en diciembre de 1999; pudiéndose observar solamente la manifestación de subsidencia asociada a uno de los dos pozos afectados (Figura 1). El pozo restante fue cerrado inmediatamente después de ocurrida la subsidencia, y la depresión producida por el hundimiento fue rellenada posteriormente con material aluvial.

El mecanismo que generó esta subsidencia superficial local, fue indudablemente la extracción de agua subterránea. De hecho, los dos pozos afectados (distantes 50 m entre sí) sufrieron hundimiento telescópico del revestimiento del pozo, lo cual es indicativo de una extracción prolongada y severa, en donde el ritmo de extracción excede al de recarga (6).

La secuencia de eventos ocurrida en El Pastal en 1999, comenzó con el hundimiento del revestimiento del pozo localizado unos 50 m al E-NE de aquel mostrado en figura 1. Posteriormente, poco más de 24 hs, se produjo el colapso telescópico (y casi concéntrico) del revestimiento asociado al pozo restante (Figuras 1, 2 y 3).

El diámetro de la subsidencia es de poco más de 10 m, mientras que su profundidad alcanza aproximadamente los 3 m (Figuras 1, 2 y 3).

La elevada salinidad natural y la cementación carbonática de los depósitos superficiales, serían responsables de la aparente disposición vertical de las paredes del hundimiento (Figuras 2 y 3).

Mediante una inspección reciente de esta manifestación de subsidencia superficial, se pudo comprobar que el agua localizada en el fondo del hundimiento (Figuras 2 y 3) tiene carácter de permanente. Su origen, por otro lado, podría estar relacionado a una freática superficial, al pozo afectado o a ambos simultáneamente.

Las condiciones hidrogeológicas (agua subsuperficial y escurrimiento superficial hacia el NE) y geológicas (sedimentos finos y sueltos, elevada salinidad superficial de los depósitos, perturbación previa producida por subsidencia y sacudimiento sísmico y alta porosidad natural) imperantes, indican que esta zona tiene un elevado potencial para el desarrollo de Piping.

La efímera manifestación de subsidencia mostrada en la figura 5, cuya dimensión es de 1.20 – 1.30 m de ancho y 0.40 – 0.50 m de profundidad, podría tener relación con este proceso.

La figura 6 muestra la distribución espacial y la evidente alineación (en dirección NE) existente entre las evidencias de subsidencia superficial.

El terremoto de 1977, además de una severa licuefacción de suelos, produjo una significativa perturbación local en el sistema de acuíferos explotados (Asentamiento Diferencial). La extracción de agua subterránea en estas condiciones de inestabilidad, posiblemente favoreció la ocurrencia de subsidencia superficial local a largo plazo, la cual estaría magnificada por el desarrollo de piping relacionado a disolución de sales y/o erosión subsuperficial de materiales finos.

## CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra que la susceptibilidad de ocurrencia, es sólo una de las componentes de un cierto peligro geológico potencial. La otra componente es la oportunidad de ocurrencia.

En El Pastal, la susceptibilidad de ocurrencia de licuefacción es la misma desde 1977 a la actualidad, pero la oportunidad de ocurrencia sólo fue alcanzada durante el Terremoto de Cauce (Ms: 7.4), no ocurriendo lo mismo durante el evento sísmico que afectó al Gran Mendoza en 1985 (Ms: 5.9).

La oportunidad de ocurrencia local para la Licuefacción de Suelos, está controlada fundamentalmente por el tamaño del evento encargado de inducir este peligro en especial, el cual ocurre en forma extensiva para terremotos de magnitudes  $M_s \geq 6.5$ .

Las manifestaciones de subsidencia superficial del terreno identificadas y cuantificadas en El Pastal, indican que las condiciones geológicas e hidrogeológicas existentes son altamente susceptibles a la ocurrencia de este peligro geológico. La oportunidad de ocurrencia, por otro lado, fue controlada fundamentalmente por la extracción severa y prolongada de agua subterránea, en un medio previamente afectado por asentamiento diferencial del terreno asociado a un significativo sacudimiento sísmico.

Estas mismas condiciones geológicas, le confieren a esta zona una elevada susceptibilidad de ocurrencia para subsidencia asociada a hidrocompactación y piping.

Actividades humanas inapropiadas podrían controlar la oportunidad de ocurrencia para una significativa subsidencia superficial futura en El Pastal.

## AGRADECIMIENTOS

El autor desea manifestar su agradecimiento al Sr. Nazareno Domizzi (hijo) por la detallada información técnica y documental referente al pozo de extracción de agua afectado por subsidencia; y a las autoridades y miembros de la Delegación de Defensa Civil del Municipio de Las Heras por la colaboración prestada durante las inspecciones de campo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Wilshire, H; Howard, K; Wentworth, C and Gibbons, H., 1996. **Geologic processes at the land surface**. U.S. Geological Survey, Bulletin 2149, 41 p.
2. Poland, J., 1984. **Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal**. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. International Hydrological Program, Studies and Reports in Hydrology, Vol. 40, 305 p.
3. Johnson, A., 1991. **Land subsidence**. International Association of Hydrological Sciences, Publication N° 200, 690 p.
4. Volponi, F; Quiroga, M; Robles, A y Sisterna, J., 1984. **El terremoto de Cauce - 23 de noviembre de 1977**. Universidad Nacional de San Juan, Instituto Sismológico Zonda, Informe Técnico, 97 p.
5. Inpres, 1986. **Características principales del terremoto de Mendoza del 26 de enero de 1985**. Instituto Nacional de Prevención Sísmica, Publicación Técnica N° 11, 43 p.
6. Alfors, J; Burnett, J and Gay, T., 1973. **Urban geology master plan for California**. California Division of Mines and Geology, Bulletin 198, 112 p.
7. Williamson, A; Prudic, D and Swain, L., 1989. **Ground - water flow in the Central valley, California**. U.S. Geological Survey Professional Paper 1401-D, 127 p.
8. Ireland, R., 1986. **Land subsidence in the San Joaquín valley, California, as of 1983**. U.S. Geological Survey, Water - Resources Investigations, Report 85-4196, 50 p.
9. Castle, R and Yerkes, R., 1976. **Recent surface movements in the Baldwin Hills, Los Angeles County, California**. USGS, Professional Paper 882, 125 p.
10. Reger, J., 2000. **Foundation engineering problems and hazards in karst terranes**. Maryland Geological Survey, Fact Sheet # 11. 7 p.
11. Newton, J., 1997. **Development of sinkholes resulting from man's activities in the United States**. U.S. Geological Survey. Circular 968, 54 p.
12. Blair-Tyler, M., 1994. **Look before you build: Geologic studies for safer land development in the San Francisco Bay Area**. U.S. Geological Survey, Circular 1130, 54 p.

13. Crowell, D., 1995. **The hazards of mine subsidence**. Ohio Division of Geological Survey, Ohio Geology, Fall, p. 1 – 5.
14. De Long, R., 1988. **Coal – mine subsidence in Ohio**. Ohio Division of Geological Survey, Ohio Geology, Fall, p. 1 – 4.
15. Crowell, D., 1997. **Mine subsidence**. Ohio Department of Natural Resources, Division of Geological Survey, Geofacts # 12, 4 p.
16. Rodríguez, J., 1978. **Estudio hidrogeológico del área El Borbollón, provincia de Mendoza**. Centro Regional de Aguas Subterráneas (CRAS), Publicación N° P – 218, 25 p.
17. Álvarez, A, Bessone, D; Gianni, R; Hernández, J; Martins, N; Pazos, J; Sobrino, J; Vivas, A y Wetten, C., 1996. **Mapa hidrogeológico de la provincia de Mendoza** (Escala 1:500.000). Centro Regional de Agua Subterránea (CRAS).
18. Departamento General de Irrigación., 1997. **Descripción preliminar de la cuenca del río Mendoza**. Documento Técnico, 112 p.
19. Barrows, A; Siang, T and Irvine, P., 1994 **Investigation of surface geologic effects and related land movements in the city of Simi Valley resulting from the Northridge Earthquake of January 17, 1994**. California Division of Mines and Geology, Open-File 94-09, 41 p.



Figura 1 : Evidencia de subsidencia superficial en El Pastal (Diámetro: > 10 m – Profundidad: ≈ 3m).  
Notar el significativo colapso telescópico del revestimiento del pozo. Fotografía: 17/12/1999.



Figura 2 : Detalle de la manifestación de subsidencia mostrada en la figura anterior. Observar la posición del remanente de la bomba de extracción y de la cerca divisoria con posterioridad al evento de hundimiento diferencial. Fotografía: 17/12/1999.



Figura 4 : Hundimiento diferencial (0.30 – 0.40 m) de las piletas de almacenamiento de vino de una pequeña bodega localizada a unos pocos centenares de metros del sitio anterior. El hundimiento fue causado por una severa licuefacción de suelos (superficial) gatillada por el terremoto de Cauçete. Fotografía: 17/12/1999.



Figura 3 : Vista frontal de la bomba de extracción en relación a la cerca. Observar la elevada salinización del suelo y de los depósitos superficiales. Fotografía: 17/12/1999.



Figura 6 : Distribución espacial de las manifestaciones de subsidencia superficial mostradas en figuras 1 y 5. Notar la evidente alineación existente entre las mismas (posible Piping). Unos 10 m detrás de la línea de árboles, se localiza el emplazamiento del restante pozo de extracción afectado. Fotografía: 18/11/2000.



Figura 5 : Manifestación reciente de subsidencia superficial localizada al SW del sitio mostrado en figura 1. Notar la significativa salinización del suelo. Fotografía: 18/11/2000.