

SUBSIDENCIA DEL TERRENO

Ground subsidence

Roberto Tomás(*), Gerardo Herrera(**), José Delgado(***) y Fernando Peña(****)

RESUMEN:

La subsidencia del terreno es un riesgo natural que afecta a amplias zonas del territorio causando importantes daños económicos y una gran alarma social. La subsidencia del terreno puede deberse a numerosas causas como la disolución de materiales profundos, la construcción de obras subterráneas o de galerías mineras, la erosión del terreno en profundidad, el flujo lateral del suelo, la compactación de los materiales que constituyen el terreno o la actividad tectónica. Todas estas causas se manifiestan en la superficie del terreno mediante deformaciones verticales que pueden variar desde pocos milímetros hasta varios metros durante periodos que varían desde minutos hasta años.

ABSTRACT

Ground subsidence is a natural hazard that affects wide areas causing important economic damages and a high social alarm. Ground subsidence may be due to several causes as deep material dissolution, excavation of ground tunnels or mining galleries, deep erosion, lateral soil creep, compaction of soil materials or tectonic activity. All these causes are manifested at terrain surface as vertical deformations that can vary from a few millimetres to several meters during periods that vary from minutes to years.

Palabras clave: subsidencia, deformación vertical, riesgo natural

Keywords: subsidence, vertical deformation, natural hazard

INTRODUCCIÓN

El término genérico de subsidencia hace referencia al hundimiento paulatino de la corteza terrestre, continental o submarina. La subsidencia terrestre, en la cual se centra el presente trabajo, es un fenómeno que implica el asentamiento de la superficie terrestre en un área extensa debido a varios factores, que pueden ser naturales o causados por el impacto de una gran variedad de actividades humanas (Corapcioglu, 1984).

La subsidencia es un fenómeno geológico que no suele ocasionar víctimas mortales, aunque los daños materiales que causa pueden llegar a ser cuantiosos. Es de gran importancia en zonas urbanas, donde los perjuicios ocasionados pueden llegar a ser ilimitados, suponiendo un riesgo importante para edificaciones, canales, conducciones, vías de comunicación, así como todo tipo de construcciones asentadas sobre el terreno que se deforma.

En este trabajo se hace un repaso por los diferentes tipos de subsidencia existentes exponiendo algunos ejemplos significativos del Mundo y de España.

TIPOS DE SUBSIDENCIA

La subsidencia del terreno es únicamente la manifestación en superficie de una serie de mecanismos subsuperficiales de deformación. Prokopovich (1979) define desde un punto de vista genético dos tipos de subsidencia: endógena y exógena. El primero de estos términos hace referencia a aquellos movimientos de la superficie terrestre asociados a procesos geológicos internos, tales como pliegues, fallas, vulcanismo, etc. El segundo se refiere a los procesos de deformación superficial relacionados con la compactación natural o antrópica de los suelos.

La subsidencia puede también clasificarse en función de los mecanismos que la desencadenan (Scott, 1979). Las actividades extractivas de mineral en galerías subterráneas, la construcción de túneles, la extracción de fluidos (agua, petróleo o gas) acumulados en reservorios subterráneos, el descenso de nivel freático por estiajes prolongados, la disolución natural del terreno y lavado de materiales por efecto del agua, los procesos morfotectónicos y de sedimentación o los procesos de consolidación de suelos blandos u orgánicos, son

(*) Departamento de Ingeniería de la Construcción, OO.PP. e Infraestructura Urbana, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, Apdo. 99, E-03080 Alicante. roberto.tomas@ua.es

(**) Área de Peligrosidad y Riesgos Geológicos. Departamento de Prospectiva e Investigación Geocientífica (IGME), c/ Alenza 1, E-28003 Madrid, Spain. g.herrera@igme.es

(***) Departamento de Ciencias de la Tierra y Medioambiente. Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante, Apdo. 99, E-03080 Alicante. Jose.delgado@ua.es

(****) Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, Edificio 2, cubículo 401, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, 04510 México D.F., México. fpem@pumas.iingen.unam.mx

algunas de las causas de los procesos de subsidencia (González Vallejo *et al.*, 2002). En la Tabla 1 se muestra un esquema de los diferentes tipos de subsidencia existentes.

Por disolución subterránea	En sal
	En yeso
	En rocas carbonáticas
Por construcción de obras subterráneas o galerías mineras	
Por erosión subterránea (tubificación o piping)	
Por flujo lateral	Rocas salinas
	Arcillas
Por compactación	Por carga
	Por drenaje
	Por vibración
	Por extracción de fluidos
	Por hidrocompactación
Tectónica	

Tabla 1. Tipos de subsidencia.

El cloruro sódico (NaCl) es uno de los materiales más solubles de la corteza terrestre. Otros materiales como el yeso y las rocas carbonáticas son también solubles en agua bajo determinadas condiciones pudiendo llegar a generar grandes sistemas de huecos interconectados entre sí cuya deformación, y colapso, en caso extremo, generan una subsidencia con un carácter localizado (Figura 1).

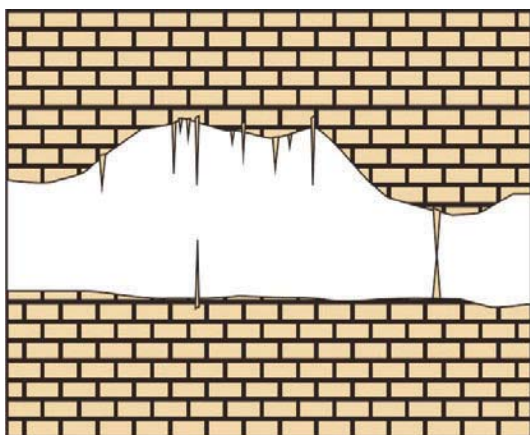


Fig. 1. Subsidencia por disolución de rocas carbonáticas.

La subsidencia minera o por construcción de obras subterráneas consiste en el hundimiento de la superficie del terreno con motivo de la deformación y/o colapso de galerías generadas para la extracción de minerales o la construcción de túneles respectivamente (Figura 2) al intentar ocupar el suelo el vacío generado los terrenos circundantes. Un ejemplo de subsidencia minera en España es el del Municipio de la Unión (Murcia) del cual hablaremos más adelante. Otro caso con una alta repercusión mediática es el del túnel del Carmel (Barcelona) que originó un colapso que encadenó el hundimiento de diversas viviendas.

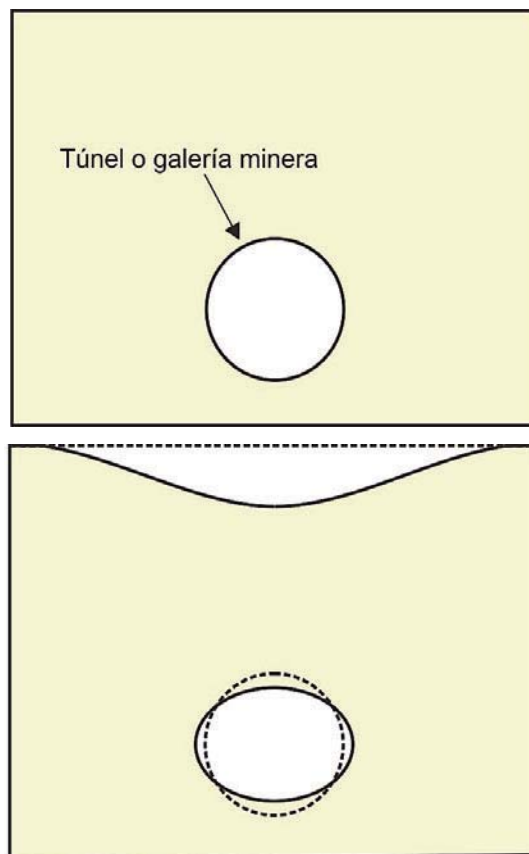
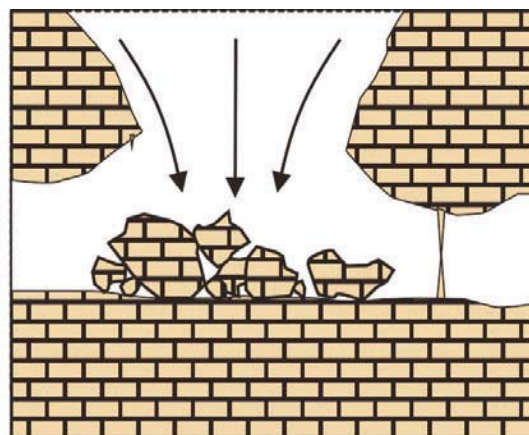


Fig. 2. Subsidencia minera.



La subsidencia por erosión subterránea se produce por un proceso mecánico de arrastre de partículas de suelo causado por el flujo de agua subterránea. El agua, en su recorrido horizontal por el terreno, moviliza partículas de suelo generando una serie de canales que pueden desencadenar colapsos del terreno (Figura 3). El fenómeno es conocido como tubificación o "piping".

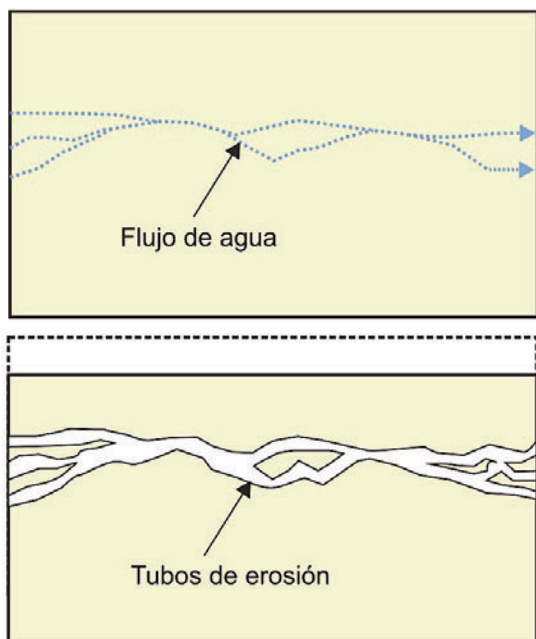


Fig. 3. Subsidencia por erosión.

En torno a diversas formaciones evaporíticas (Figura 4a) se producen fenómenos de subsidencia asociados a la actividad diapírica. Este tipo de fenómenos de flujo lateral se ha observado en materiales arcillosos intercalados entre materiales más competentes como pizarras (Figura 4b).

La acumulación natural sucesiva de sedimentos o determinados tipos de cimentaciones pueden ocasionar la consolidación del terreno como consecuen-

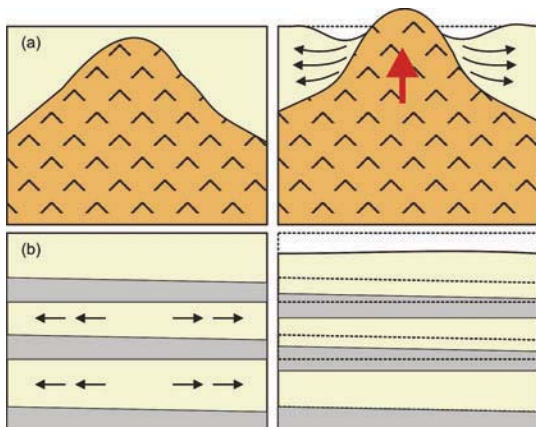


Fig. 4. Subsidencia por flujo lateral (a) en materiales salinos y (b) en arcillas plásticas intercaladas entre materiales más competentes.

cia del peso que ejercen los sedimentos o las construcciones (Figura 5). Esta subsidencia se produce por una reducción gradual de los huecos del suelo.

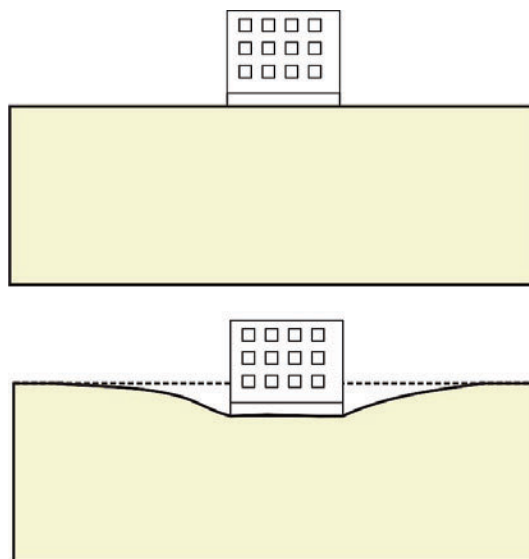


Fig. 5. Subsidencia por carga.

Las vibraciones producidas por los terremotos, explosiones u otras causas pueden causar la densificación de terrenos granulares sueltos por reajuste de partículas al alcanzar éste una estructura más compacta (Figura 6).

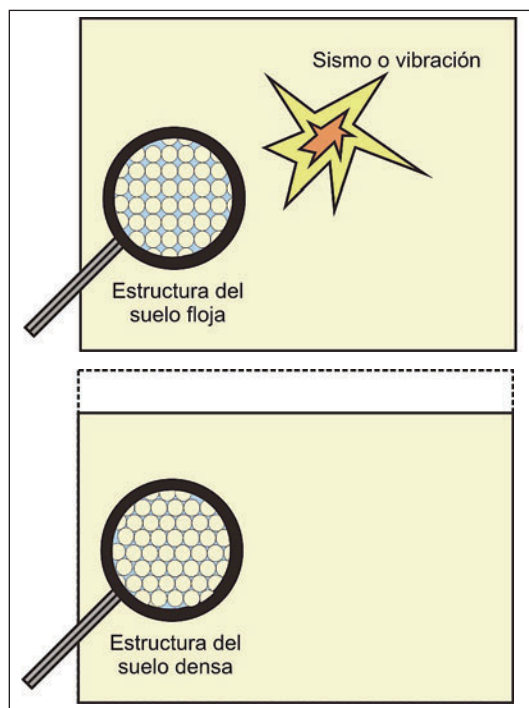


Fig. 6. Subsidencia por vibraciones.

La extracción de fluidos (agua, gas o petróleo) desde el terreno puede causar importantes valores de subsidencia como consecuencia del cierre gradual de los huecos rellenos por el fluido extraído.

La subsidencia causada por extracción de agua desde el subsuelo (Figura 7) afecta a importantes ciudades como México D.F., Venecia, Valle de San Joaquín (EE.UU.), Taipei (Taiwán), Tokio (Japón), Pekín (China). En España destaca el caso de Murcia que se desarrollará en apartados posteriores.

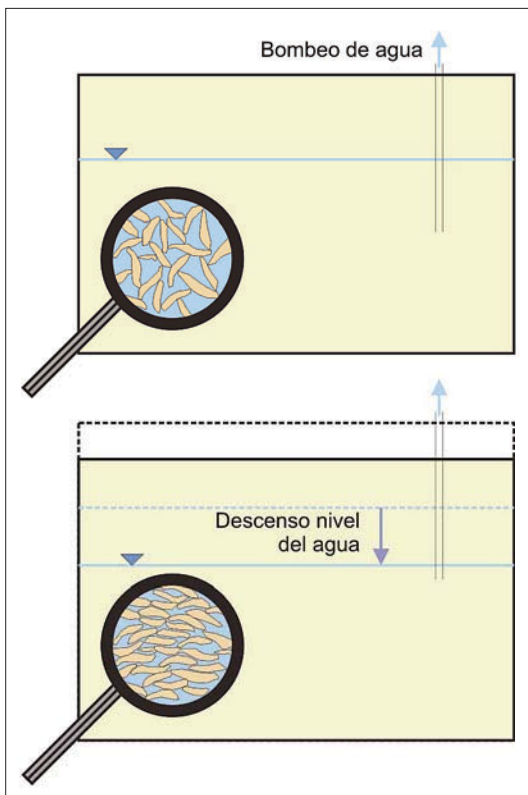


Fig. 7. Subsidencia por extracción de agua.

La hidrocompactación puede causar asientos de la superficie terrestre comprendidos entre 1 a 5 m. Este fenómeno consiste en el asentamiento que se produce en determinados tipos de suelos, con un bajo contenido de humedad y situados sobre el nivel freático, al ser saturados (Figura 8). La presencia de agua puede causar dos tipos de efectos en este tipo de suelos, la disolución de los enlaces entre partículas o la pérdida de las tensiones capilares que en ambos casos sostienen las partículas de suelo pa-

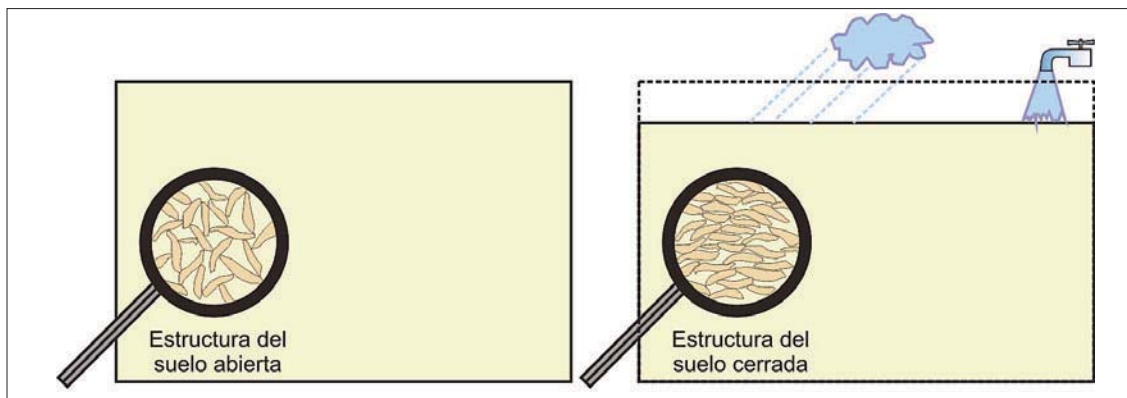


Fig. 8. Subsidencia por hidrocompactación.

ra configurar su estructura. En España existen suelos limosos susceptibles de sufrir este efecto en la zona de Levante y en el valle del Ebro.

Los descensos de la superficie terrestre producidos por las fallas producen un efecto conocido como subsidencia tectónica. Este tipo de subsidencia es, en general, muy lenta y de pequeña magnitud (de pocos mm o décimas de mm al año) frente a otros tipos de subsidencia.

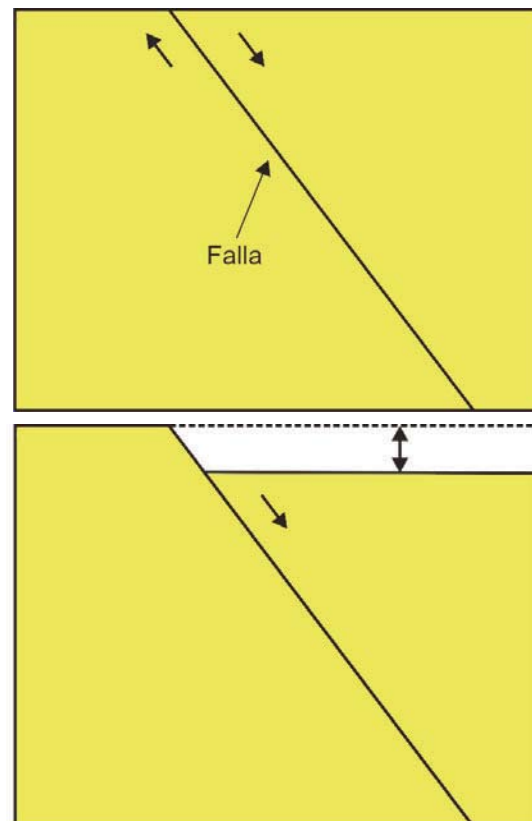


Fig. 9. Subsidencia tectónica.

El Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2009) ha elaborado una base de datos internacional de subsidencia disponible en Internet en la que se recogen fichas técnicas de los diferentes casos de subsidencia reconocidos en el mundo.

EJEMPLOS DE SUBSIDENCIA

En este apartado se muestran diversos casos reales de subsidencia de terreno. El primer caso presentado corresponde a la ciudad norteamericana de México D.F.. Los otros dos casos expuestos son el de las ciudades españolas de Murcia y de la Unión. Los dos primeros casos tienen como causa principal desencadenante la extracción de agua desde los acuíferos infrayacentes. El caso de la Unión corresponde a una subsidencia asociada a actividad minera.

Subsidencia de la ciudad de México

La ciudad de México – Tenochtitlan fue fundada por los aztecas en 1325 sobre unos islotes en el lago que se encontraba en la cuenca de México. Con el paso del tiempo, los aztecas construyeron islotes artificiales, llamados chinampas, con el fin de ganar tierra para cultivo y para el crecimiento propio de la ciudad. Posteriormente, los españoles establecieron la capital de la Nueva España sobre los restos de la antigua ciudad azteca. Debido a una serie de inundaciones que afectó la ciudad en el siglo XVII, los españoles decidieron abrir la cuenca con la construcción de los tajos de Huehuetoca y Nochistongo, con el fin de desecar el sistema lacustre para evitar futuras inundaciones, lo que llevó a la paulatina desaparición del lago.

Actualmente, gran parte de la ciudad de México se ha desarrollado sobre los restos del antiguo lago. Estos restos están formados por niveles arcillosos con un alto contenido de agua (humedad media del 400%), cuyo espesor varía entre 30 y 70 m con una alta deformabilidad.

Tanto en la época prehispánica como en la colonial, el hundimiento de los pesados edificios religiosos y civiles se debió a la consolidación natural de las arcillas. Este fenómeno constituyó un serio problema para los constructores; el cual hizo necesario realizar frecuentes reconstrucciones y modificaciones, las cuales han continuado hasta nuestros días. Así, la Figura 10 muestra la fachada poniente del Palacio de Minería, construido a mediados del siglo XVIII. Se observa cómo el piso inferior presenta una deformación en forma de catenaria debi-



Fig. 10. Fachada poniente del Palacio de Minería de la ciudad de México. Obsérvese el esquema constructivo del edificio.

do al hundimiento de la construcción; sin embargo, el piso superior no presenta dicha deformación. Esto es debido a que la subsidencia que se presentó durante la construcción fue corregida por los constructores en los pisos superiores.

Con el tiempo, el suelo bajo estos edificios se fue consolidando y el problema fue disminuyendo. Sin embargo, la subsidencia se acentuó nuevamente desde mediados del siglo XX, cuando las necesidades de agua potable de la ciudad llevaron a la explotación cada vez más intensa de los acuíferos de la cuenca, con el consiguiente drenaje del agua desde los estratos de suelo blando y su consolidación que es el origen del hundimiento del terreno (Figura 11). Para dar una visión clara de su magnitud veamos algunos datos: el nivel del terreno en la plaza central de la ciudad (el Zócalo) ha descendido cerca de 7.5 m desde inicios del siglo XX hasta la actualidad; la subsidencia actual es de unos 8 cm/año, sin que haya señales de que vaya a reducirse en el futuro. Los efectos de esta subsidencia han sido particularmente graves para el sistema de drenaje de la ciudad y para los edificios históricos. La única forma de resolver el problema es logrando un equilibrio entre la cantidad de agua que se extrae de los acuíferos y la que se recarga en los mismos por la filtración de agua de lluvia o por la inyección de agua tratada.

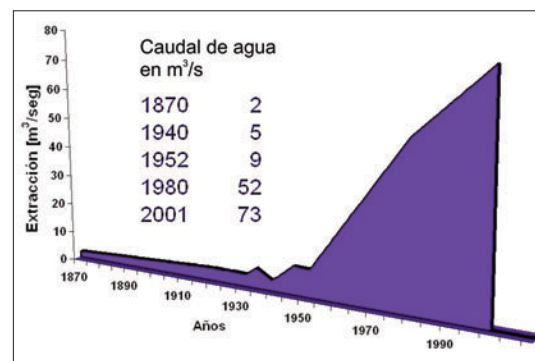


Fig. 11. Aumento de la cantidad de agua extraída del subsuelo de México D.F.

Las construcciones modernas y los edificios históricos de la ciudad se comportan de modo diferente ante la subsidencia. En los edificios históricos la principal problemática es debida a asentamientos diferenciales, es decir, la deformación no es uniforme bajo la cimentación, debido principalmente a que distintos sitios han alcanzado diferentes grados de consolidación, dependiendo del peso de los edificios previos a los actuales. Así, las áreas sobre las que existió en el pasado una construcción muy pesada (por ejemplo estructuras aztecas) están más consolidadas y se deforman menos que otras por no haber recibido cargas importantes (huertos, calles, etc.), están menos consolidadas. Este fenómeno provoca que una zona con topografía originalmente regular presente pendientes e irregularidades en su elevación, las cuales se acentúan con el tiempo, y que los edificios ubicados en dicha zona se deformen (Fi-



Fig. 12. Deformación de la fachada de un edificio histórico por asientos diferenciales.

gura 12). La mampostería de piedra, que constituye el material básico de estos edificios, es particularmente sensible a las distorsiones inducidas por los asentamientos diferenciales; por ello los edificios presentan fuertes agrietamientos e inclinaciones que amenazan su seguridad (Figura 13).



Fig. 13. Ruinas de una antigua pirámide azteca afectada por asientos diferenciales. Al fondo se aprecia un edificio colonial afectado también por asientos diferenciales (grietas en la fachada).

En las construcciones modernas los asentamientos diferenciales no representan, generalmente, un problema. Sin embargo, durante el diseño y construcción de nuevas edificaciones, es importante tener en cuenta el fenómeno de subsidencia regional. Así algunos edificios construidos a mediados del siglo XX presentan el fenómeno de “emersión”. Este fenómeno se debe a que dichos edificios se cimentaron sobre pilotes, los cuales se apoyan sobre niveles duros (rocosos) existentes en profundidad (pilotes columna), bajo los niveles arcillosos, por lo que su cimentación no se ve afectada por la consolidación de las arcillas (Figura 14). Sin embargo, conforme la ciudad sufre subsidencia, estos edificios no sufren movimiento alguno, por lo que el efecto que se produce es similar a una emersión del edificio. La Figura 15 muestra un edificio en el centro de la ciudad que fue construido en los años 20 del siglo XX. Este edificio está cimentado sobre pilotes columna, por lo que no sigue el hundimiento regional y se encuentra actualmente unos 2 m por encima del nivel de calle. Actualmente, este fenómeno se puede evi-

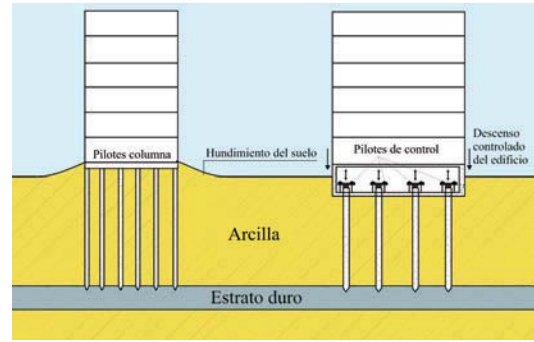


Fig. 14. Ejemplo de cimentaciones realizadas con pilotes columna y pilotes de control.

tar utilizando otro tipo de cimentación, como por ejemplo los llamados pilotes de control, que permiten eliminar la emersión del edificio (Figura 14) mediante un descenso controlado del edificio.



Fig. 15. Edificio que presenta el fenómeno de emersión, al estar cimentado sobre pilotes de punta.

Subsidencia de la ciudad de Murcia

La ciudad de Murcia está situada en el sector más oriental de la Cordillera Bética, en el valle de la Vega Media del río Segura. El relleno del valle está constituido por materiales detríticos poco consolidados de edades comprendidas entre el Mioceno y el Cuaternario mientras que los bordes están delimitados por una serie de relieves periféricos de edad comprendida entre el Mioceno a Triasico al NW y SE.

Desde los años 90, la explotación del acuífero se ha intensificado considerablemente, de forma especial durante los periodos de sequía pluviométrica. Como consecuencia de esta sobreexplotación se produjeron descensos piezométricos considerables en el acuífero durante los periodos 1993-1996, 2000-2001 y 2006-2008 cuya magnitud media en la ciudad de Murcia fue de 6, 4 y 8 m respectivamente, con valores extremos de hasta 15 m. Este descenso piezométrico produce una reducción de la presión del agua existente en los huecos del suelo por lo que éstos se cierran progresivamente, causando un reajuste de las partículas, disminuyendo su volumen y, por lo tanto, generando la subsidencia superficial del terreno.

Como ya se ha comentado, en los años 90 tuvo lugar una importante crisis piezométrica que causó el hundimiento del terreno en gran parte de la ciu-

dad causando daños en más de 100 edificios y en la infraestructura urbana (aceras, conducciones, muros, etc.) (Figura 16) y generando una gran alarma social entre la población.



Fig. 16. Ejemplos de patologías en infraestructura urbana y edificación. Obsérvese como incrementa la separación entre los dos edificios con la altura.

Entre el periodo 1993-2007 se ha producido una importante subsidencia generalizada en toda la cuenca sedimentaria del río Segura, con valores que llegan puntualmente hasta los 12 cm. En la ciudad de Murcia, los mayores asentamientos absolutos se localizan en el S y SE de la ciudad (Figura 17) alcanzando valores inferiores a 10 cm.

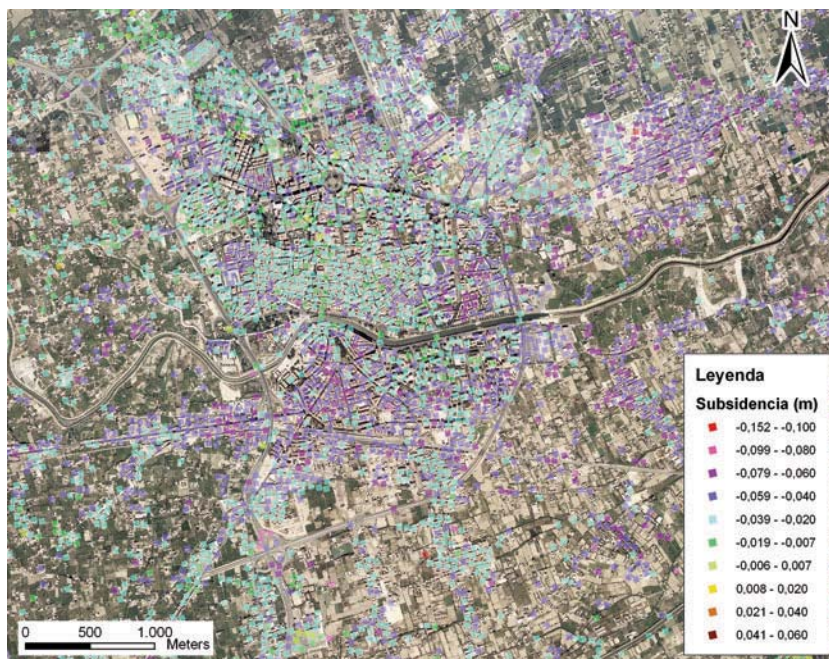


Fig. 17. Valores de subsidencia de la ciudad de Murcia correspondiente al periodo temporal 1993-2007 medida desde satélite mediante interferometría SAR diferencial (Tomás, 2009).

En la Figura 18 se observa la relación existente entre la evolución del nivel piezométrico y la subsidencia en un punto de medida. Como puede observarse los descensos piezométricos llevan asociados subsidencia a la vez que las recuperaciones piezométricas generan ascensos de la superficie de menor magnitud debido a que parte de la deformación previa es irreversible.

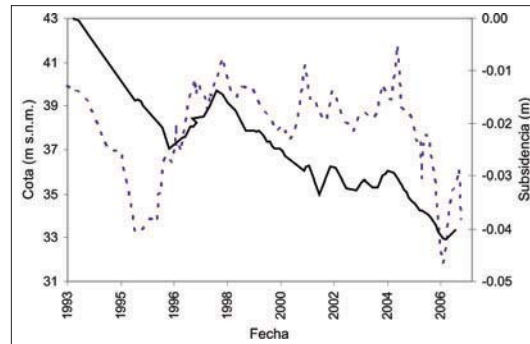


Fig. 18. Evolución temporal de la subsidencia (continua) y del nivel piezométrico (puntos) en un pozo situado al SW de la ciudad.

Subsidencia de La Unión

La Unión es un antiguo pueblo minero situado en la Sierra de Cartagena, en la provincia de Murcia. Geológicamente se enmarca en el dominio interno de las cordilleras Béticas, ha sido explotada intermitentemente por la minería de plomo y zinc desde la época de los romanos llegando, tras varios periodos de inactividad, hasta finales del siglo XX (Manteca y Ovejero., 1992). Por este motivo se encuentran bajo la superficie gran cantidad de galerías mineras abandonadas (Figura 19) que ocasionan inestabilidades del terreno. En Mayo de 1998, co-

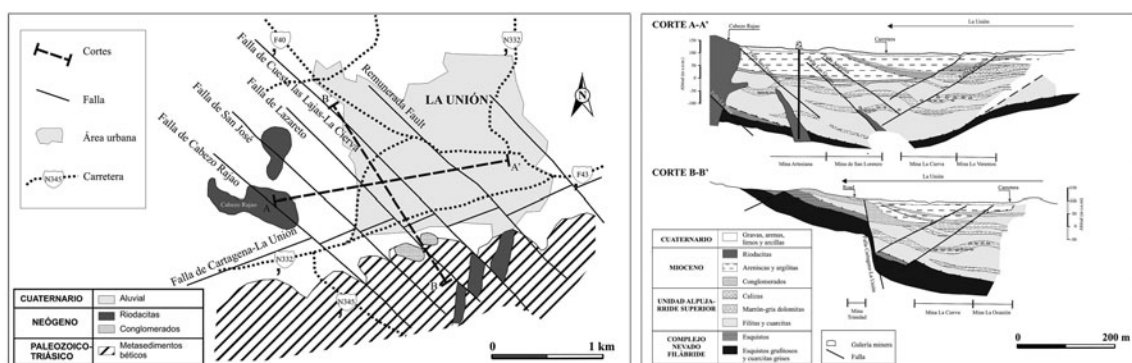


Fig. 19. Mapa geológico de La Unión con ubicación de las isolíneas de subsidencia y cortes geológicos de la zona de estudio (basado en Rodríguez et al., 2000).

menzaron a observarse importantes asientos de terreno en un área aproximada de 1 km x 1 km (Figura 19) afectando a las edificaciones del polígono industrial de Lo Tacón (La Unión), causando una gran alarma social entre la población.

La Consejería de Industria y Medio Ambiente (CIMA, 2005) de la Región de Murcia impulsó varios trabajos para estudiar la subsidencia ocurrida. Se instaló una red de nivelación topográfica con 25 puntos de control. Hasta junio de 1999, se midieron asientos máximos de -53.6 cm (-4.8 cm/mes) en el centro de un área circular de unos 300 m de diámetro (Figura 19), ubicada sobre antiguas explotaciones mineras subterráneas. En diciembre de 2002 se incrementó el número de puntos de control hasta 57 y se midieron asientos máximos de -5.3 cm hasta julio de 2004 en el centro de dicho área. Resulta importante indicar que en este lugar es en el que mayor concentración de minados se han cartografiado, con un valor medio del 67% de huecos, entre los 80 y los 250 m bajo la superficie (Rodríguez et al., 2000). El volumen de subsidencia calculado fue de 20.810 m³, que equivale aproximadamente al 7.5% del total de minados, considerando una altura media de 4 m. Las grietas detectadas en la zona occidental eran desgarramientos sinexosos compresivos, mientras que en la zona oriental las grietas eran abiertas, hecho que permitió indicar que además de desplazamientos verticales hubo desplazamientos horizontales hacia el noroeste. Esta hipótesis, junto con la del hundimiento observado entre las fallas de Las Lajas-La Cierva y de Lazareto, permitió correlacionar a Rodríguez et al. (2000), la ocurrencia del sismo del 2-5-1998 con la subsidencia. De esta forma el terremoto, a pesar de ser de pequeña magnitud, pudo propagar su energía a través del plano de dicha falla, desencadenando el hundimiento y provocando un efecto en cadena en la zona de minados. Los movimientos experimentados por el terreno también se han controlado desde 1998 a Diciembre de 2004 utilizando técnicas de interferometría diferencial avanzada, observando tendencias de los hundimientos similares a las observadas mediante nivelación topográfica (Herrera 2007).

CONCLUSIONES

La subsidencia del terreno es un fenómeno consistente en el hundimiento de la superficie terrestre

cuyo origen puede deberse a diversas causas generando cuantiosos daños en aquellas infraestructuras que se asientan sobre ella. En este artículo se repasan los diferentes tipos de subsidencia existentes mostrando además dos casos en España y un tercer caso correspondiente a la ciudad de México D.F.

BIBLIOGRAFÍA

- CIMA. (2005). *Topographical levelling data of Lo Tacón industrial area in April 2003 and July 2004*. Dirección de Industria, Energía y Minas de la Consejería de Industria y Medio Ambiente de la Región de Murcia, 20 pp.
- Corapcioglu, M.Y. (1984). Land subsidence a state of the art review. *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*. En: Bear and M. Y. Corapcioglu (Ed.), *NATO ASI Series E.82*, Martinus Nijhoff Publishers, 369-444.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Ed. Prentice Hall, Madrid, 715 pp.
- Herrera G., Tomás, R., López-Sánchez, J.M., Delgado, J., Mallorequí, J.J., Duque, S. y Mulas, J. (2007). Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain). *Engineering Geology*, 90, 148-159.
- Manteca, J. I. y Ovejero, G. (1992): Los yacimientos Zn, Pb, Ag - Fe del distrito minero de La Unión - Cartagena, Bética Oriental. *Recursos Minerales en España*, ed.). *CSIC*, 5: 1085-1102.
- Prokopovich, N.P. (1979). Genetic classification on land subsidence. En: Saxena, S.K. (ed.). *Evaluation and prediction of subsidence. Proc. of the Int. Conf.*, Pensacola Beach, Florida, January 1978, Am. Soc. Civil Eng., New York, 389-399.
- Rodríguez-Estella, T., Manteca, J. L. y García, C. (2000): Subsidencia minera, en relación con sismotectónica, en La Unión (Murcia). *Geotemas* 1, 150-153.
- Scott, R.F. (1979). Subsidence - A review. En: Saxena, S.K. (ed.). *Evaluation and prediction of subsidence. Proc. of the Int. Conf.*, Pensacola Beach, Florida, January 1978, Am. Soc. Civil Eng., New York, 1-25.
- Tomás, R. (2009). *Estudio de la ciudad de Murcia mediante Interferometría SAR diferencial avanzada*. Tesis doctoral. Universidad de Alicante. 480 pp.
- USGS (2009) ISOLS- *Internacional Survey on Land Subsidence* Base de datos de ejemplos de subsidencia en el mundo: <http://isols.usgs.gov>

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 22 de diciembre de 2008 y aceptado definitivamente para su publicación el 18 de mayo de 2009.