

# Medición del Hundimiento y Modelo para Estudiar el Agrietamiento de la Ciudad DE AGUASCALIENTES

Mario E. Zermeño de León<sup>1</sup>, Enrique Mendoza Otero<sup>1</sup>,  
Gregorio Calvillo Silva<sup>2</sup>

## INTRODUCCIÓN

Se presentan los resultados de un estudio desarrollado en la UAA sobre el problema del agrietamiento superficial de la Ciudad de Aguascalientes; la hipótesis principal del estudio es que la extracción del agua subterránea ha inducido una consolidación gradual de los estratos compresibles del subsuelo, provocando agrietamientos severos del terreno, con la formación de escalones en la superficie. La trayectoria y forma de las grietas queda definida principalmente por la forma irregular del basamento rocoso del subsuelo y debido a la naturaleza del terreno que consiste en material granular y limoso; a diferencia de la Ciudad de México —el cual es básicamente arcilla con un basamento sin irregularidades— que induce un asentamiento uniforme y sin la formación de escalones.

## OBJETIVO

Con el objeto de monitorear el hundimiento de la Ciudad de Aguascalientes, se llevaron a cabo una serie de mediciones topográficas en siete sitios de la zona urbana. Estas mediciones calibrarían un modelo numérico de elementos finitos del subsuelo (depósito aluvial) que permitirían simular, en la superficie del terreno,

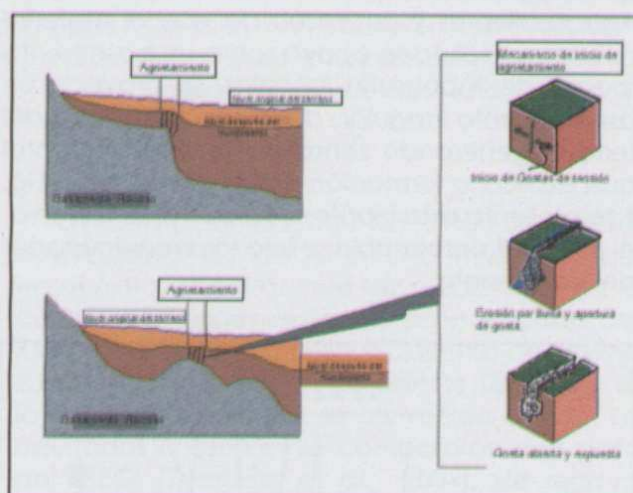


Figura 1. Hipótesis de la formación de grietas en la zona urbana de Aguascalientes.

la formación de zonas de esfuerzos horizontales de tensión y en consecuencia susceptible de agrietarse.

## ANTECEDENTES

En el año de 1985 el Ing. José Manuel Aranda Gómez, investigador de la UAA, propuso establecer un sistema de monumentos-testigos que permitiera, por medio de nivelaciones, caracterizar el movimiento de las grietas que a partir de 1980 aparecieron en la Ciudad de Aguascalientes y sus alrededores (Aranda y Aranda, 1985). El período de medición que

<sup>1</sup> Profesores investigadores, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción, Departamento de Construcción y Estructuras.

<sup>2</sup> Ingeniero Civil, Egresado de la UAA, asesor externo.

llevó a cabo el Ing. Aranda fue de sólo un año (1985). Afortunadamente la mayoría de los monumentos-testigos se conservan a la fecha, lo que ha permitido continuar la observación de la evolución de los movimientos de las grietas. Durante 1993-1998 y hasta el mes de marzo de 2003, el Ing. Gregorio Calvillo Silva (Calvillo, 2003) continuó las mediciones con algunos levantamientos topográficos locales sobre los monumentos.

## HIPÓTESIS

La extracción del agua subterránea induce una consolidación gradual del relleno aluvial que subyace la zona urbana de la Ciudad de Aguascalientes y, en razón de que el material que se consolida se apoya sobre un basamento rocoso de topografía irregular, se provoca un asentamiento irregular, de la superficie libre del terreno generando zonas de tensión horizontal que explica la formación de las grietas. En la Fig. 1 se presenta esta hipótesis, tal como se observa, el material deformable refleja las irregularidades del basamento.

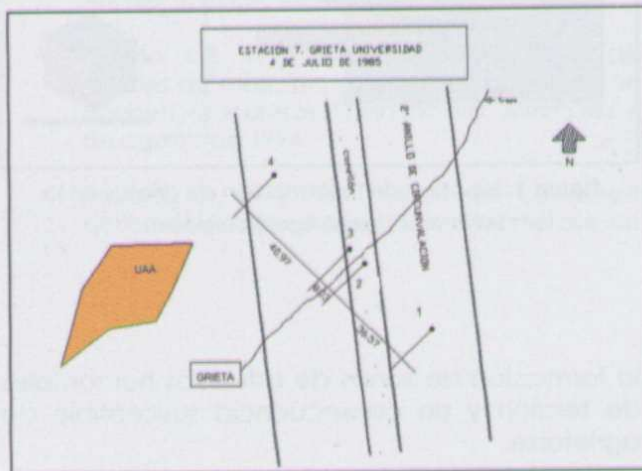


Figura 2. Localización de los monumentos en la estación 7 sobre Segundo Anillo de Circunvalación.

## METODOLOGÍA

En la Fig. 2 se presenta una de las siete estaciones de control establecidas por el Ing. Aranda. Cada estación de control se construyó con cuatro monumentos alineados, perpendiculares a la traza de la grieta que se manifiesta en el sitio de la estación. En 1985 se

efectuaron mediciones de nivelación diferencial con tránsito; para las campañas posteriores se usaron estaciones totales. Los levantamientos están referidos a un banco de nivel de inicio con una cota fija de 100 metros asignada arbitrariamente.

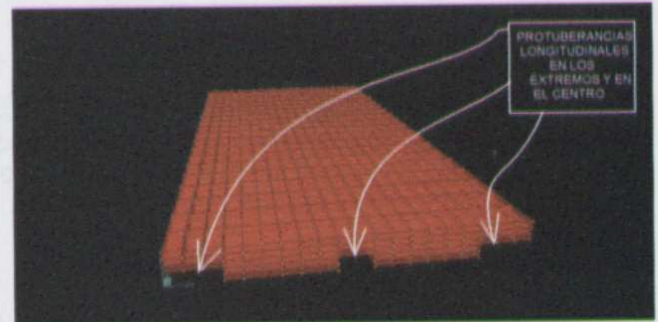


Figura 3. Modelo de elementos finitos para simular la deformación de un volumen cualquiera.

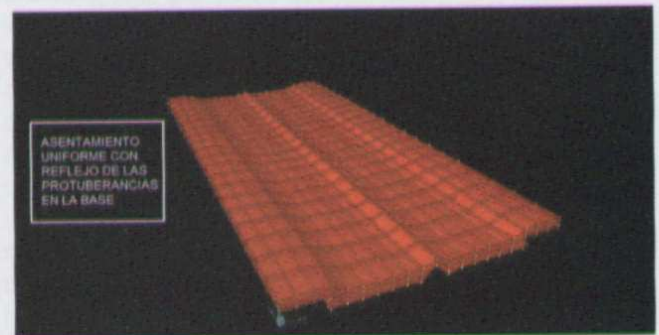


Figura 4. Deformada del volumen irregular con un asentamiento uniforme, lo cual induce el reflejo de las protuberancias.

Con el modelo numérico de elementos finitos de un suelo apoyado sobre una base irregular se llevaron a cabo, con el programa de computadora SAP2000, simulaciones que permitieron observar la formación de zonas de tensión horizontal en la superficie libre del suelo deformado. Un ejemplo del modelo de elementos finitos con forma irregular y apoyado en tres bordes longitudinales, dos laterales y uno central, se presenta en la Fig. 3. Como se muestra en la Fig. 4, cuando este modelo se somete al efecto de su peso propio se tiene una deformación uniforme del modelo, pero por la presencia de la base irregular se reflejan zonas de tensión por encima de estos bordes, que son evidentes en la Fig. 5.

Por lo anterior, es notorio que para definir el modelo numérico de elementos finitos del

subsuelo, es necesario definir con la mejor exactitud posible la forma del basamento rocoso o incomprensible, que subyace los depósitos aluviales de la Ciudad de Aguascalientes. Para esto, se llevó a cabo una recopilación de información de la estratigrafía de los pozos ubicados en la zona urbana, teniendo acceso a la información proporcionada por CCAPAMA, quien proporcionó los datos de más de cien pozos con información de los diferentes estratos del terreno. Esta información permitió dibujar en forma aproximada diferentes secciones transversales y dibujar en 3-D la forma preliminar del basamento incomprensible.

## RESULTADOS

Las cotas, en metros, de las siete estaciones como resultados de las mediciones realizadas desde 1985 (Aranda y Aranda, 1985) hasta el 2003 (Calvillo, 2003) se presentan en la Tabla 1. En ella se observa que el mayor desnivel se presenta en la estación 6 (Av. López Mateos Oriente, frente a la Alberca Olímpica), ya que en el curso de 18 años se ha presentado un desnivel de aproximadamente 76 cm que implica una velocidad de desplazamiento de 4.2 cm/año.

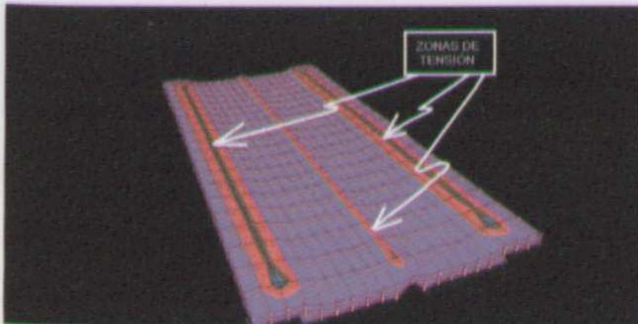


Figura 5. Resultado del análisis de esfuerzos en las zonas de apoyo del volumen deformado.

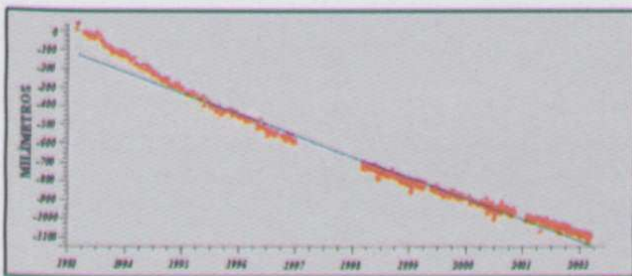


Figura 6. Resultado de mediciones realizadas con GPS para la estación fija del INEGI. Presenta valores promedio de hundimiento de 12 cm/año para la zona urbana.

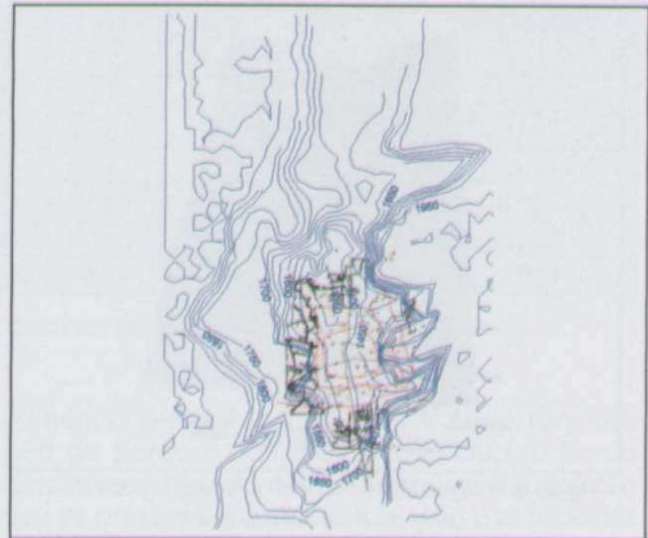


Figura 7. Curvas de nivel de basamento obtenidas con datos de estratigrafía de los pozos de la Ciudad de Aguascalientes y de Jesús María.

En las estaciones 2, 3 y 7 no se han presentado desplazamientos de la misma magnitud que en el resto, mientras que las mediciones en las cuatro estaciones restantes proporcionan una idea de la magnitud del hundimiento de algunas zonas de la ciudad en los últimos 18 años y de la velocidad con que se ha venido dando. Los resultados anteriores se compararon con datos del INEGI (Zermeño et al, 2004), de registros desde 1993 con GPS sobre el hundimientos en una estación localizada en el edificio del propio Instituto. Los resultados de las mediciones se muestran en la Fig. 6, donde se muestra en el eje vertical la lectura del asentamiento de la estación en milímetros, mientras que en el eje horizontal se muestra la evolución en el tiempo de dicho asentamiento.

Como resultado de la recopilación de información de la estratigrafía de los pozos ubicados en la zona urbana, en la Fig. 7 se muestran las curvas de nivel del basamento rocoso de la zona urbana. En la Fig. 8 se muestra el basamento en 3-D.

En la Fig. 9 se muestra un corte transversal de la zona urbana propuesto para el modelo con elementos finitos del relleno aluvial que se presenta en la Fig. 10; empleando el programa de computadora SAP2000, el modelo se somete a un proceso de deformación uniforme tal como

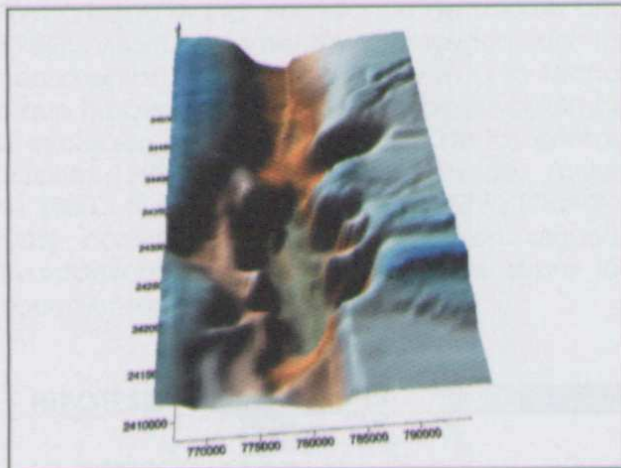
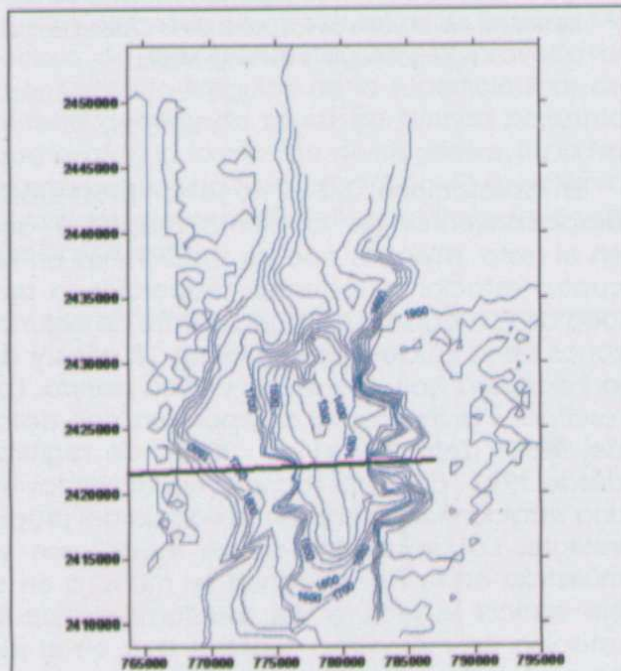
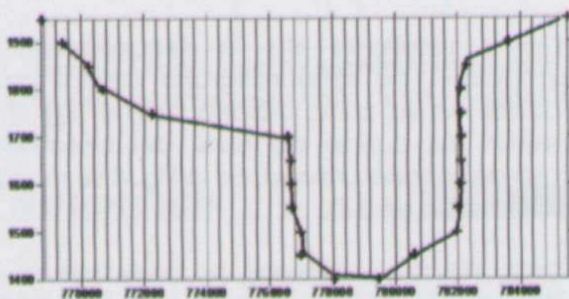


Figura 8. Imagen tridimensional obtenida a partir de las curvas de nivel del basamento.



(a)



(b)

Figura 9. Generación de secciones transversales (b) a partir de las curvas de nivel de basamento (a).

ocurre cuando se realiza la extracción del agua y de consolidación, generándose zonas de tensión horizontal en su superficie libre, como lo muestran los resultados de la Fig. 11.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De las nivelaciones topográficas llevadas a cabo en los monumentos existentes, se observa que las estaciones 1 y 6, ubicadas sobre la Avenida Adolfo López Mateos ( que atraviesan la ciudad por el centro en sentido oriente-poniente), muestran un asentamiento de 76 cm y de 55 cm respectivamente en un período de 18 años; si se suman ambos desniveles se obtiene un total de 1.31 metros hacia el poniente de la ciudad, esto sin considerar posibles hundimientos fuera de estas estaciones de monitoreo, ya que se trata de mediciones relativas independientes entre sí.

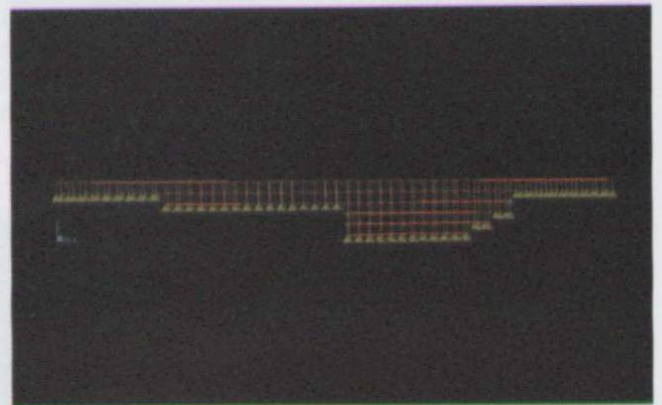


Figura 10. Generación de elementos finitos para la selección transversal de la figura 9.

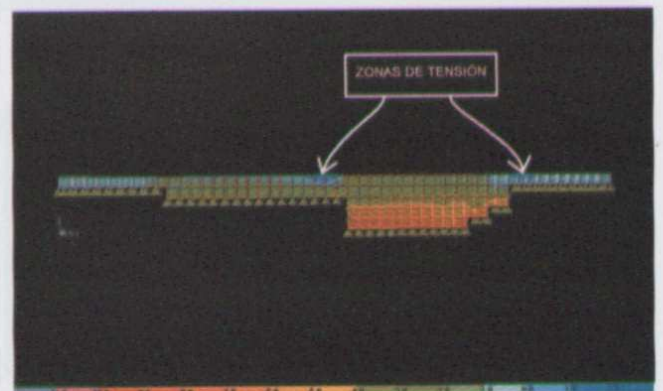


Figura 11. Obtención de las zonas de tensión en la sección transversal de la figura 9.

ESTACION	1985	1993	1998	2003	DESNIVEL	VELOCIDAD
1 Grieta Del Valle	99.35	99.12	99.11	98.80	0.55	0.031
2 Jardines de la Asunción IMSS	98.91	98.82	98.79	98.76	0.15	0.008
3 Grieta Centro	99.71	99.62	99.61	99.58	0.13	0.007
4 Grieta Zona Militar	97.90	97.78	97.64	97.56	0.34	0.019
5 Grieta San Cayetano	99.19	99.03	98.85	98.81	0.38	0.021
6 Grieta IV Centenario	98.36	98.10	97.80	97.60	0.76	0.042
7 Grieta Universidad	98.83	98.82	98.79	98.76	0.07	0.004

**Tabla 1.** Resultados de las nivelaciones topográficas en siete diferentes sitios de la ciudad.

De los resultados de las mediciones del INEGI se tiene que la velocidad de hundimiento calculada es de  $11.18 \pm 0.96$  centímetros por año; sin embargo, se observa claramente que durante los últimos tres años que abarca el estudio la velocidad ha disminuido.

Se puede decir que la tendencia del hundimiento es hacia el poniente de la zona urbana, esto tiene relación con la forma del basamento rocoso, ya que al presentarse este basamento a profundidades mayores de 500 metros, en la zona poniente es donde existen mayores irregularidades de su configuración. Lo cual permite concluir que la forma del basamento obtenido coincide con las mediciones efectuadas en la superficie, ya que hacia el poniente es donde se presenta la caída del bloque de las grietas.

En la zona oriente se observa que el basamento rocoso emerge y presenta un contacto más definido con el material más deformable que existe hacia el centro de la zona urbana, es por lo que la grieta oriente de la Ciudad tiene una trayectoria casi lineal, mientras que la del lado poniente es más irregular (Municipio de Aguascalientes, 2003).

La simulación numérica mediante elementos finitos permite llevar a cabo de manera sencilla y práctica la visualización del efecto de la consolidación de los estratos deformables del subsuelo. De los resultados de los análisis con computadora, se observa que en los puntos donde el basamento presenta irregularidades en su configuración se refleja una grieta en la superficie del terreno. Esta grieta no es puntual sino que abarca un ancho, que depende de la profundidad de la irregularidad y de su forma.

Para efectos prácticos de construcción de viviendas, la aplicación de la simulación

numérica presentada en este trabajo requiere aún de precisar con mayor exactitud la forma del basamento, ya que el alcance del estudio que se presenta es bastante amplio y se requiere acotar aún las zonas de riesgo con un nivel de confiabilidad mayor, de manera tal que se debe de asegurar la probable aparición de grietas en un terreno determinado.

## CONCLUSIONES

1. Del análisis de la componente vertical de las mediciones topográficas obtenidas, se observa claramente un hundimiento general de la zona urbana con una tendencia de los bloques de las grietas de hundirse hacia el poniente de la Ciudad; sin embargo, para tener una mejor estimación de la magnitud de estos movimientos en cada punto, así como sus velocidades, se realizarán más observaciones.
2. En cuanto a la componente horizontal de las mediciones topográficas, no se logra observar una tendencia hacia una dirección en especial, lo que da como conclusión que, de existir desplazamientos, éstos no han sido significativos hasta el momento.
3. La metodología descrita en el presente trabajo muestra la necesidad de conocer la forma del basamento del subsuelo para explicar la aparición de zonas de tensión en la superficie del terreno; también muestra la ventaja de que se pueden manejar programas de computadora que emplean métodos numéricos, tales como los elementos finitos para simular la aparición de zonas de tensión y, por lo tanto, se pueden definir zonas de riesgo para la construcción de viviendas.

4. La calibración de las mediciones efectuadas en la superficie permite confirmar que hacia el poniente el basamento presenta una mayor irregularidad y profundidad, que con respecto del oriente donde existe un mayor contraste definido por la situación de que el basamento rocoso emerge y el contacto entre el material sedimentario del centro de la zona urbana se separa de la roca, formando una trayectoria clara, prácticamente lineal, de agrietamiento.
5. El conocimiento de la forma y profundidad del basamento rocoso depende en gran medida de los datos de las perforaciones de pozos, o bien de estudios geofísicos orientados hacia este propósito en particular; sin embargo, en la medida de que se conozca con precisión dicha forma se puede concluir que es posible la predicción de la evolución de los agrietamientos en el futuro.
6. Considerando la importancia que representa este tipo de proyectos y los resultados que los levantamientos geodésicos y de geofísica pueden aportar, se deben aprovechar las experiencias adquiridas y retomar la problemática presentada durante los trabajos de campo y gabinete, con el fin de afinar la metodología de trabajo para obtener los mejores resultados de manera más oportuna.

#### ANTECEDENTES DE TRABAJOS RELACIONADOS

Este trabajo es una síntesis del Informe elaborado para el Instituto del Agua del Gobierno del Estado de Aguascalientes, por parte de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, y en particular por el Departamento de Construcción y Estructuras adscrito al Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción (Zermeño *et al.*, 2004).

#### REFERENCIAS

1. Aranda Gómez, José Manuel y José Jorge, Aranda Gómez, *Análisis del Agrietamiento en la Ciudad de Aguascalientes*, Reporte elaborado para CONACyT, Universidad Autónoma de Aguascalientes, 1985.
2. Calvillo Silva, Gregorio, *Comunicación Personal*, 2003.
3. Zermeño de León, Mario, Enrique, Mendoza Otero y Luis Alfredo, Hernández Castillo, *Identificación y Monitoreo de Grietas Geológicas en la Ciudad de Aguascalientes*, Proyecto de Investigación financiado por INAGUA, Universidad Autónoma de Aguascalientes, 2004.
4. Municipio de Aguascalientes, Secretaría de Obras Públicas, *Sistema Digital de Fallas Geológicas de la Ciudad de Aguascalientes*, 2003.