
CARACTERIZACIÓN DIRECTA E INDIRECTA

FSDR-01

CAMBIOS EN LA RIGIDEZ DEL SUELO DEBIDO A LOS ESFUERZOS DE TENSIÓN, EXPLICACIÓN DEL MECANISMO DE AGRIETAMIENTO EN SUELOS

Alfonso Alvarez Manilla Aceves y Guadalupe E. I. Martínez Peña
 Instituto Mexicano del Transporte
 E-mail: amanilla@imt.mx

En las superficies del agua subterránea, inmersas en los conos de abatimiento, cambia drásticamente el campo de esfuerzos efectivos, generando tensiones que cuando son mayores a la rigidez del suelo provoca la aparición de dos fases últimas de la deformación por flujo hidrodinámico: Fase 2, Generación de Grietas de Tensión y la Fase 3, Crecimiento de Fallas de tensión.

Se presenta la manera de medir la rigidez del suelo, su resistencia a la tensión y se compara con el campo de esfuerzos efectivos en campo en zonas donde han aparecido grietas y fallas de tensión por sobreexplotación del acuífero y la extracción de vapor: como son los Valles de Querétaro, Celaya, Aguascalientes y la Unidad de Tejamaniles en el Campo Geotérmico de los Azufres.

FSDR-02

COMPORTAMIENTO HIDROMECAÍNICO DE SEDIMENTOS LACUSTRES EN VALLES VOLCÁNICOS: CASOS DE CHALCO Y QUERÉTARO

Dora Carreón Freyre y Martín Hernández Marín
 Centro de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla, Querétaro
 E-mail: mhmarin@geociencias.unam.mx

En este trabajo se presentan los resultados del estudio de la variabilidad de las propiedades hidromecánicas de sedimentos vulcanolacustres, en lo que se refiere a sus condiciones de deformación y de flujo del agua de poro, y se correlacionan con sus propiedades geológicas y físicas. La consolidación mecánica de los sedimentos limo-arcillosos que rellenan valles volcánicos se manifiesta en la superficie como subsidencia. Esta consolidación se refiere a la deformación unidimensional que sufren diferentes tipos de materiales sedimentarios finos, que generalmente presentan una alta superficie específica y una alta porosidad, debido al desplazamiento del agua de poro en la matriz del suelo y a la eventual deformación de la fase sólida. La deformación diferencial de materiales heterogéneos puede llevar a su fracturamiento debido a la concentración de esfuerzos de cizalla que pueden ser estimados a partir de la correlación entre la compresibilidad, plasticidad, granulometría y permeabilidad de los diferentes materiales que integran la

secuencia fluvio-lacustre. Se comparan dos secuencias sedimentarias en cuencas con diferentes historias geológicas recientes en los valles de Chalco y Querétaro, poniendo de manifiesto la importancia de la historia de deposición y evolución de los sedimentos en su comportamiento hidromecánico. Estas secuencias comprenden intercalaciones de material piroclástico con alternancias de limos y arcillas con diferente orden de cristalización y con contenidos variables de materia orgánica. Se analiza también la influencia de interdigitaciones de rocas volcánicas en el perfil de suelos como otro factor generador de deformación diferencial. Con los resultados obtenidos se pretende avanzar hacia criterios específicos de zonificación geotécnica y al establecimiento de riesgo de fracturamiento en las zonas estudiadas que pueden ser extrapolados a áreas urbanas con problemas similares.

FSDR-03

CARACTERIZACION DE PROCESOS DE SUBSIDENCIA-CREEP-FALLA EN SEDIMENTOS LACUSTRES POR MEDIO DEL RADAR DE PENETRACION TERRESTRE (GPR)

R. Alvarez¹, D. Ibáñez-Garduño², V.H Garduño-Monroy³, I. Israde-Alcantara³, E. Arreygue-Rocha³ y J. Hermance⁴

¹ Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, UNAM

E-mail: rab@leibniz.iimas.unam.mx

² Instituto Mexicano del Petróleo, Campeche

³ Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMNSH, Morelia

⁴ Department of Geological Sciences, Brown University

El proceso de subsidencia-creep-falla (PSCF) se observa en múltiples lugares; sin embargo, cuando ocurre en zonas urbanas es particularmente dañino. Algunas de las áreas afectadas por este tipo de fallas se observa en Ravena, Italia, en la zona de Houston-Galveston en Texas, Las Vegas, Nevada y en México en varias ciudades del centro de la república como Aguascalientes, Celaya, Morelia y Querétaro, todas ellas localizadas sobre antiguas cuencas lacustres. El proceso de subsidencia se encuentra asociado en las ciudades a sobreexplotación de acuíferos y exacerbado por condiciones climáticas adversas, como la presencia del fenómeno de El Niño. Aquí hemos escogido a la ciudad de Morelia como zona de estudio para caracterizar este tipo de procesos, con ayuda del radar de penetración terrestre (Ground Penetrating Radar, o GPR) y apoyados en observaciones geológicas directas en zanjas. Efectuamos levantamientos perpendiculares al rumbo de falla en una docena de lugares afectados en la ciudad de Morelia con el método de reflexión y antenas de 50 Mhz, logrando penetraciones que variaron entre 6 y 10 m. Los radargramas fueron filtrados para disminuir la influencia de las ondas directas de aire y tierra; utilizamos una ganancia de control automático para permitir la extracción de las señales más tenues a profundidad. Los resultados muestran que además de la falla principal se detectan fallas sintéticas y antitéticas a la misma. La zona de influencia en ambos lados de la falla varía de 15 a 50 m, encontrándose mayores alteraciones en el bloque caído de la falla. Aunque los desniveles en superficie no

llegan a un metro, hay lugares que reflejan, en el subsuelo varios metros de desnivel. En todo caso el control estructural lo ejercen las fallas en el basamento. Estos resultados permiten definir las zonas de riesgo antes de hacer construcciones que serán afectadas posteriormente por estas fallas.

FSDR-04

ANÁLISIS DE SUBSIDENCIA EN LA CIUDAD DE MÉXICO MEDIANTE INSAR Y GPS

Enrique Cabral-Cano¹, Timothy H. Dixon² y Osvaldo Sánchez¹

¹ Instituto de Geofísica, UNAM

E-mail: ecabral@igeofcu.unam.mx

² Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Sciences, University of Miami, Miami, FL., USA

La interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) es una técnica que calcula el patrón de interferencia causado por la diferencia de fase entre dos imágenes adquiridas por un sistema de Radar de Apertura Sintética (SAR). En este trabajo se presentan los resultados del análisis de subsidencia en la zona metropolitana de la Ciudad de México basados en InSAR y GPS.

El análisis de InSAR se llevó a cabo utilizando técnicas de triple paso con imágenes SAR adquiridas en Febrero-Mayo 1996 y Julio 1999 - Marzo 2000. Los resultados indican que la mayor subsidencia se detecta en el área de Cd. Nezahualcóyotl, al oriente de la Ciudad de México. Esta zona sufrió una subsidencia de 184 mm durante 1999-2000, que representa una tasa de subsidencia anual de aproximadamente 383 mm/año. Este valor es muy cercano a las tasas máximas de subsidencia registradas en el centro de la ciudad a mediados del siglo pasado. En el centro histórico de la Ciudad se observa una subsidencia de 55 mm durante 1999-2000, lo cual implica una tasa de hundimiento de 115 mm/año.

Para validar estos interferogramas se determinó el movimiento vertical que presentan las estaciones AIBJ (Aeropuerto Internacional), UIGF (Ciudad Universitaria) y UCHI (Cerro Chiquihuite) a partir de técnicas de GPS durante los últimos 6 años. El procesamiento de GPS muestra que la zona del Aeropuerto Internacional Benito Juárez presenta una tasa de hundimiento de 291 mm/año. Los interferogramas indican un hundimiento de 100 mm para 1996 y de 148 mm en 1999-2000, lo cual equivale a una tasa anual de 347 mm/año (1996) y de 309 mm/año (1999-2000). En contraste, la zona poniente del área metropolitana muestra un movimiento que no es significativo; esto se comprueba mediante las estaciones de GPS UIGF y UCHI donde el movimiento vertical es despreciable.

Los resultados indican que los períodos observados mediante InSAR presentan tasas de subsidencia que son muy similares a las tasas determinadas por GPS que cubren un período de más de 7 años observados lo cual indica que no se trata de variaciones estacionales, sino de un proceso continuo y de gran magnitud. La correlación del patrón interferométrico

con las unidades estratigráficas cartografiadas con anterioridad indican que la distribución geográfica del proceso de subsidencia está controlado primordialmente por la consolidación de arcillas de origen lacustre. La comparación de ambos resultados es excelente considerando los márgenes de error de cada método. Estos resultados, aunados a la gran coherencia de las imágenes en la zona urbana a lo largo de varios meses, indican que la técnica de InSAR es un método viable para mantener una estrecha vigilancia de los procesos de subsidencia.

FSDR-05

LAS FRACTURAS DE DESECACION DE LA CIUDAD DE MEXICO

Luis Silva Mora y Julia Rivera Jaramillo

Instituto de Geología, UNAM

E-mail: lsilva@servidor.unam.mx

Dirección General De Construcción Y Operación Hidráulica

El valle de México contiene en su parte central y suroccidental, el área urbana de la ciudad de México, que tiene una altitud promedio de 2,240 m.s.n.m., y se localiza en la parte central del Arco Volcánico Transmexicano. Las sierras que lo circundan, originan una cuenca endorreica con desagüe artificial, pues el drenaje natural hacia la cuenca hidrográfica del Río Amacuzac fue interrumpido, propiciando la formación de un lago en la parte sur de este, al norte de la sierra Chichinautzin. Lago que recibió los productos de la erosión del relieve en su entorno, así como los productos de cortos y locales eventos volcánicos, materiales que lo azolvieron paulatinamente. El relleno en general, esta constituido por material volcánico y tobas retrabajadas, intercalado basicamente con material lacustre y aluvial en las partes centrales de la cuenca y zonas de transición.

La formación de grietas o fracturas de desecación en la ciudad de México, aparentemente se debe a la riqueza de arcilla como uno de los componentes principales en las capas que forman el suelo y subsuelo del valle. Razón por la que la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (D.G.C.O.H) desde 1996 ha implementado un programa para el monitoreo periódico del movimiento y comportamiento en las grietas que se forman en esos materiales. Esto se apoya en un levantamiento topográfico de precisión que ha permitido conocer tres direcciones de movimiento que ocurre en dichas estructuras; dos son horizontales de dirección Norte-Sur y Este-Oeste, el tercero es vertical para cada uno de los puntos de control establecidos. El método topográfico para medir el movimiento horizontal en las grietas; tiene como base una poligonal de apoyo, y puntos de control que forman secciones transversales perpendiculares a la traza de la fractura, la altitud se establece con una nivelación diferencial que define la altura en relación al nivel del mar para cada uno de los puntos establecidos. Este proceso permite una clasificación inicial de las grietas, así como el tipo de monitoreo que cada caso requiere, en función de los siguientes criterios:

1.- Cuantas y cuales son las instalaciones de la D.G.C.O.H. que están o pueden ser afectadas por la actividad de esas estructuras.

2.- En que zonas de la ciudad, la red de distribución de agua potable y drenaje puede ser o esta afectada por dichas grietas.

3.- Es una sola fractura o forma un sistema, que longitud y amplitud tiene la zona de fracturamiento, afecta obras de otras instituciones o pueden afectar la actividad de esta o estas.

4.- Si la obra ya esta dañada que tipo de daño presenta, es un ducto o tubería rota, tipo de construcciones, existen o tienen fugas que originen socavamiento o tubificaciones que debiliten obras de importancia?.

Estos criterios permiten la clasificación arbitraria y preliminar de las grietas, su descripción y localización. Son los elementos que forman la primera parte de este trabajo, los criterios anteriores se establecen en función de las evidencias megascópicas que cada fractura presenta, y permiten su correlación con relación a estructuras civiles, relieve, rasgos morfológicos y tectónicos, lo que permitirá finalmente establecer las relaciones que estas tienen con la tectónica que actualmente actúa en el valle de México.

CASO DE ESTUDIO: QUERÉTARO

FSDR-06

CONFIGURACIÓN DEL BASAMENTO Y AGRIETAMIENTOS SUPERFICIALES DEL SUELO EN EL VALLE DE QUERÉTARO

Pacheco M. Jesús y Arzate Jorge A.
 Centro de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla, Qro.
 E-mail: pachecojm@yahoo.com.mx

En varias ciudades del País tales como Aguascalientes, Abasolo, Celaya, Irapuato, Morelia, Querétaro, Silao, Zapopan, etc., los agrietamientos inducidos han causado daños severos a la obra civil y se pueden asociar en primera instancia a los hundimientos de suelo por consolidación debida a la extracción de fluido del subsuelo. En todos estos casos existe una obvia relación entre los abatimientos de los niveles freáticos, los hundimientos de terreno y la aparición de agrietamientos.

Una característica común entre éstas zonas urbanas es que están localizadas en cuencas tectónicas rellenas de sedimentos terciarios y cuaternarios, flanqueados por fallas geológicas de carácter regional cuya influencia es determinante en la generación de agrietamientos. En el caso Querétaro, se ha observado una fuerte correlación entre la localización de agrietamientos y la presencia de importantes irregularidades en

el basamento "no compresible", que no es otra cosa que una unidad impermeable consolidada de profundidad variable (50-250 m) que constituye la base del acuífero superficial

Estudios previos en el valle de Querétaro así como otros estudios reportados en la literatura (Arroyo y colegas, 2001; Rucker y Keaton, 1996; Robert, 1979) han demostrado la utilidad de algunas técnicas geofísicas para estudiar el fenómeno de subsidencia, tales como refracción sísmica, micro gravimetría y sondeos audio-magnetotelúricos entre otros. Estas herramientas han permitido evaluar las condiciones estructurales del subsuelo en zonas específicas del valle de Querétaro cuyos resultados han sido útiles en la elaboración de modelos analíticos de subsidencia que permiten hacer predicciones tanto de la magnitud de los hundimientos como de la ubicación de zonas de riesgo de agrietamientos (Rojas y colegas, 2002). Sin embargo, a la fecha esto solo se puede hacer parcialmente debido a la limitada cantidad de datos disponibles. En este trabajo se muestra la utilidad de los estudios gravimétricos para definir el riesgo de la aparición de agrietamientos y se propone un análisis de curvas de anomalías gravimétricas como una herramienta que puede ser usada para identificar zonas potenciales de riesgo de agrietamientos.

FSDR-07

FACTORES GEOLÓGICOS Y GEOMECÁNICOS QUE CONDICIONAN LA EVOLUCIÓN DEL FRACTURAMIENTO EN EL RELLENO SEDIMENTARIO DE LA CIUDAD DE QUERÉTARO

Dora Carreón-Freyre¹, Mariano Cerca¹, Carlos Vargas-Cabrera¹,
 Javier Gámez-González² y Juan Álvarez-Rodríguez²

¹ Centro de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla Qro.

E-mail: freyre@servidor.unam.mx

² Gerencia Estatal Querétaro, Comisión Nacional del Agua

En este trabajo se presenta un modelo conceptual sobre la evolución de la falla que afecta a la zona central de la Ciudad de Querétaro (Falla Central, FC). Desde hace ya varias décadas, se ha relacionado el desarrollo de fracturas y fallas en zonas urbanas ubicadas en valles con el abatimiento piezométrico que desequilibra los sistemas sedimentarios naturales. Sin embargo, la evolución de las fracturas esta condicionada principalmente por la interacción entre diversos factores geológicos y geomecánicos. Los factores geológicos tales como fallas pre-existentes y las condiciones de deposición del relleno sedimentario influyen en la evolución y geometría de la deformación superficial regional; mientras que los factores geomecánicos tales como heterogeneidades en la compresibilidad y permeabilidad de sedimentos fluviales, lacustres, depósitos piroclásticos y rocas volcánicas, controlan las variaciones de la deformación en escala local y en tiempos relativamente cortos.

Las deformaciones superficiales pueden además ser inducidas por cambios en las condiciones climáticas (como lluvias torrenciales) y por variaciones espaciales de la presión de poro en los diferentes estratos de la secuencia sedimentaria.

En el caso de Querétaro, el registro sedimentario obtenido del análisis de pozos muestra un depósito continuo y normalmente graduado desde la formación del valle en el Mioceno Tardío - Plioceno Temprano. La secuencia superficial limo-arcillosa alcanza en algunas zonas los 150 m de espesor. La elevación del valle se ubica en las cotas de 1800 y 1810 m.s.n.m., al poniente y al oriente de la FC respectivamente, pero las irregularidades topográficas mayores son hacia el oriente. La FC tiene una traza lineal que une dos segmentos de falla normal orientados ~N-S y desplazamientos mayores de 100 m que afectan rocas volcánicas en los márgenes norte y sur del valle. La FC presenta variaciones importantes en su desplazamiento vertical a lo largo de su traza (desde algunos centímetros hasta más de un metro en las zonas críticas). En su segmento norte los desplazamientos mayores alcanzan los 2 m mientras que en su segmento central la falla es discontinua y se desvía hacia el poniente con una trayectoria de semiarco que sigue la geometría del Cerro de las Campanas. En su segmento sur, la deformación se distribuye en tres fracturas paralelas y discontinuas que afectan una mayor superficie y que le dan un aspecto de abanico. Finalmente, al sur de la carretera libre Querétaro-Celaya, la traza superficial desaparece al aumentar la pendiente del terreno. Los perfiles de Radar de Penetración Terrestre que fueron levantados en zonas sin desplazamiento evidente dentro de la traza de la FC, registran discontinuidades en el subsuelo que sugieren que la fractura se propaga hacia la superficie. Esta observación esta apoyada por evidencias de desplazamientos verticales que aumentan con la profundidad y en diferencias de espesor de la misma capa en ambos lados de la FC. Cabe agregar que los patrones de abatimiento piezométrico, calculados para el periodo 1993-2001 no muestran una correlación directa con la geometría de la fractura. Nuestro modelo propone que la orientación de la fractura esta relacionada con las discontinuidades estructurales pre-existentes, pero las variaciones locales de desplazamiento, orientación y distribución de la deformación son determinadas por la heterogeneidad mecánica de la secuencia superficial.

FSDR-08

CONTROL ESTRATIGRÁFICO DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL VALLE DE QUERÉTARO

Carlos Vargas-Cabrera¹, Dora Carreón-Freyre¹, Jaime Garfias-Soliz² y Javier Gámez-González³

¹ Centro de Geociencias, UNAM. Campus Juriquilla Qro.
E-mail: varcarlos@hotmail.com

² Centro Interamericano de Recursos del Agua, UAEM, Toluca

³ Gerencia Estatal Querétaro, Comisión Nacional del Agua

En el Valle de Querétaro se ha reportado una excesiva extracción de agua subterránea en los últimos 30 años y varios trabajos relacionan esta práctica con el fenómeno de fracturamiento observado en su superficie. Sin embargo, no existe un marco hidrogeológico conceptual adecuado que explique como ocurre la respuesta espacio-temporal de los materiales acuíferos a la extracción de agua subterránea. Con el fin de proponer un marco hidrogeológico para el Valle de

Querétaro, se elaboraron configuraciones de las variaciones piezométricas registradas de 1990 a 2001 y se analizó su relación con la litología y fracturamiento en la superficie del valle. El acuífero del Valle de Querétaro está integrado por dos unidades acuíferas: (1) unidad superficial de tipo granular, semiconfinada en su parte superior, y (2) unidad fracturada, subyacente a la anterior, confinada en la parte central de los valles y libre en la periferia hacia las sierras circunvecinas. La unidad acuífera granular está compuesta por sedimentos fluvio-lacustres con intercalaciones de lavas y piroclásticos y presenta un espesor promedio de 150 m hacia las partes bajas del valle. La unidad acuífera fracturada consiste en un conjunto de rocas volcánicas de composición basáltica a riolítica, con intercalaciones de ignimbritas, tobas y brechas cuyo espesor llega 350 m hacia la zona de sierras aledañas.

La configuración de la superficie piezométrica en la parte meridional del Estado de Querétaro indica la conexión hidráulica que existe en los valles de la región y señala una dirección de flujo del agua subterránea del norte, sur y este hacia el Valle de Querétaro y su condición de zona de descarga regional. La excesiva extracción del agua subterránea en este valle ha ocasionado un abatimiento de los niveles piezométricos a un ritmo promedio de 3.8 m/año localizándose, para algunos periodos, abatimientos críticos de 4 a 6.6 m/año en lugares como la zona industrial Benito Juárez (NW de la Cd. de Querétaro). Sin embargo, la configuración de la evolución piezométrica muestra una respuesta diferente de la unidad acuífera granular a los descensos de la carga hidráulica para los periodos analizados. La variabilidad piezométrica y los registros litológicos sugieren que la unidad granular debe ser considerada hidrogeológicamente como un acuífero multicapa, lo que implica integrar un análisis detallado de la estratigrafía local para evaluar los ordenes de variación de parámetros como la conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento para los diferentes estratos. Asimismo se considera el análisis de perfiles de geoquímica e isotopía del agua subterránea para explicar el comportamiento hidráulico de la unidad acuífera granular.

FSDR-09

HUNDIMIENTO MÁXIMO ESPERADO Y DEMARCACIÓN DE LAS ZONAS DE AGRIETAMIENTO EN EL VALLE DE QUERÉTARO SEGÚN SU POTENCIAL ACUÍFERO

Alfonso Alvarez Manilla Aceves¹, Francisco Fernández Hernández² y Juventino García Becerra³

¹ Instituto Mexicano del Transporte
E-mail: amanilla@imt.mx

² Geo Ingeniería Alfvén, S.A. de C.V.

³ Geotecnia y Concreto, S.C.

Con base en el desarrollo de una ecuación para acoplar el flujo hidrodinámico y la deformación (tanto de aplicación en los campos petroleros, geotérmicos y acuíferos), se hace una evaluación del hundimiento máximo esperado según el potencial acuífero, tomando en cuenta el espesor de las

unidades geológicas y el basamento geohidrológico, así como de las propiedades mecánicas e hidráulicas ya sea de los materiales granulares o rocas constitutivos del subsuelo.

Se presentan las configuraciones del hundimiento para los años: 2002, 2005, 2010, 2020, y 2040; con ello se demarcan los gradientes hidráulicos muy tendidos y se induce las zonas de agrietamiento potencial.

Se presenta la evaluación de los desarrollos de las grietas y fallas de tensión por sobreexplotación del acuífero y el tiempo en el que estará totalmente declinado el acuífero.