

Centro de Evaluación de Riesgo Geológico de la Delegación Iztapalapa, Ciudad de México

Raúl Gutiérrez Calderón², Dora Carreón Freyre¹, Mariano Cerca¹, Daniel Blancas², Gabriela Morales², Alejandra Jiménez², Marcos González², Francisco Espinoza²

Corresponding autor: freyre@geociencias.unam.mx

¹ Laboratorio de Mecánica Multiescalar de Geosistemas, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

² Centro de Evaluación de Riesgo Geológico (CERG) de la Delegación Iztapalapa, México D.F.



ABSTRACT

We present results of the work of the Center of Evaluation of Geological Risk (CERG) belonging to the Delegation Iztapalapa (DI), Mexico City. The DI urban infrastructure is highly affected by fracturing and land subsidence and the municipality is probably one of the places with the highest social related vulnerability to fracturing. The CERG has established a multidisciplinary approach to understand the fracture related mechanisms, including: (1) Mapping and geophysical prospecting, (2) Database management strategy and, (3) Facilities including a laboratory for physical and mechanical characterization of soils, and an interactive hall for outreach and educational purposes. The results show that localization of fracturing and deformation are highly dependent on local geomechanical conditions of the subsoil and geological discontinuities. Physical vulnerability of the DI area to geological hazards is evaluated through the spatial analysis of the generated information based on thematic maps. The Atlas of Risks includes the geological risk assessment for urban infrastructure and allow a better planning of mitigation strategies and urban development in the DI.

RESUMEN

Se presentan resultados del trabajo del Centro de Evaluación del Riesgo Geológico (CERG) de la Delegación Iztapalapa (DI) en la ciudad de México. La infraestructura urbana se encuentra afectada por la subsidencia y el fracturamiento y la DI presenta una alta vulnerabilidad social al fracturamiento. El CERG trabaja de manera multidisciplinaria para entender los mecanismos relacionados con el fracturamiento, la metodología incluye: (1) cartografía y prospección geofísica, (2) una base de datos digital y (3) un edificio que incluye un laboratorio para la caracterización física y mecánica de los suelos y una sala interactiva con el propósito de educar a la comunidad en esta problemática. Los resultados obtenidos muestran que la localización del fracturamiento y deformación dependen de las condiciones geomecánicas locales del subsuelo y de las discontinuidades geológicas. La vulnerabilidad física a los peligros geológicos de la DI se evalúa a partir del análisis de la información generada en mapas temáticos. El Atlas de Riesgos incluye la evaluación de los riesgos geológicos para la infraestructura urbana y permite una mejor planeación de las estrategias de mitigación y el desarrollo urbano de la DI.

1 INTRODUCCION

El territorio de la delegación Iztapalapa, en la Ciudad de México, se encuentra afectado por los fenómenos de la subsidencia y el fracturamiento. Los daños a la infraestructura urbana son de grandes dimensiones y se destina un alto porcentaje de recursos económicos en reparaciones, principalmente de la red hidráulica. Existen más de 14,000 viviendas con distintos grados de afectación, lo que eleva la vulnerabilidad de la comunidad ante los riesgos geológicos. Con el fin de realizar estudios que aporten elementos para el diseño de políticas públicas enfocadas a la mitigación del riesgo por fracturamiento, en el año de 2007 inició un proyecto de colaboración entre el Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México y la Delegación Iztapalapa. Como resultado de esta colaboración entre el gobierno y la institución académica, surgió el Centro de Evaluación de Riesgos Geológicos de Iztapalapa, que funciona con una metodología diseñada

para atender los problemas de la delegación en materia de riesgo geológico.

1 ANTECEDENTES

La Ciudad de México y su zona metropolitana se asientan sobre la planicie que ocuparon los antiguos lagos de Texcoco, México, Chalco y Xochimilco (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). Este sistema lacustre fue desecado artificialmente para dar paso al proceso de urbanización que inició al final del siglo XV, mediante la construcción de obras hidráulicas que fueron hechas por los Aztecas para regular los niveles de los lagos.

Posteriormente, en la época colonial (Figura 1), se realizaron obras de drenaje que redujeron el tamaño de los cuerpos de agua, con el objeto de ganar tierra que sería utilizada para la ganadería, y cultivo. El siglo XIX se caracterizó por la expansión de la ciudad de México, que

fue integrando los pueblos fundados desde la época prehispánica.

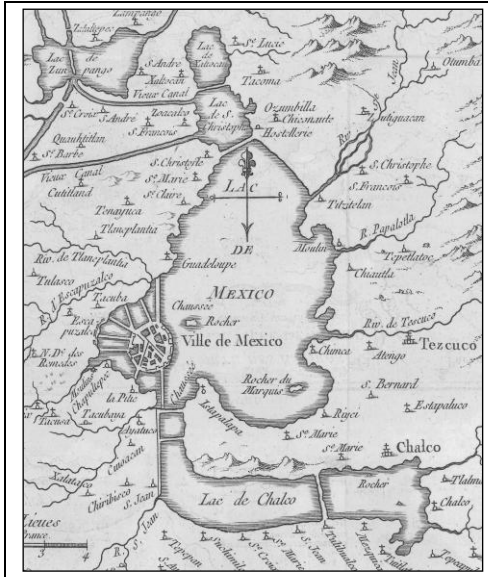


Figura 1. Fragmento de "Carte des environs de la ville de Mexico, 1754" del Instituto Cartografico de Cataluña donde se observan los poblados asentados alrededor de la zona lacustre. La zona de estudio se encuentra entre el poblado de Iztapalapa y el Peñón del Márques (*Rocher du Marquis*)

Actualmente, la zona metropolitana cuenta con más de 20 millones de habitantes, de los cuales, 8 millones pertenecen a la Ciudad de México, lo que hace de esta zona una de las más densamente pobladas del mundo.

La Delegación Iztapalapa se ubica al oriente de la Ciudad de México, cuenta con 2 millones de habitantes y abarca una extensión de 116 kilómetros cuadrados, en donde las elevaciones mayores en la zona, corresponden a edificios volcánicos compuestos por andesitas, basaltos y rocas piroclásticas de edad Plioceno – Pleistoceno de la Sierra de Santa Catarina, Cerro de la Estrella y Peñón del Marques. El valle ubicado entre las edificaciones volcánicas, se encuentra relleno de una secuencia compuesta por rocas volcánicas, piroclásticas (tobas y cenizas) y sedimentos de diferentes tipos como arcillas, suelos orgánicos, limos, depósitos aluviales y de pendiente.

La población de Iztapalapa creció durante los años sesentas y setentas debido a las migraciones de los estados del sureste de la república mexicana. Los límites de la zona urbana se fueron extendiendo hasta lugares poco aptos para la construcción de viviendas factor que, aunado a la composición socio-económica de la región, condujo a la producción de viviendas con materiales precarios y numerosas deficiencias estructurales (Colegio de Arquitectos de la Ciudad de México, 2004).

Desde principios del siglo XX, la extracción de agua por bombeo del subsuelo ha sido la alternativa para dotar del recurso a la población que ha ido en ascenso. Sin embargo, el bombeo está provocado un desequilibrio de las condiciones hidráulicas y mecánicas del subsuelo que desencadena los procesos de subsidencia y fracturamiento. Actualmente la subsidencia continúa (Cabral-Cano et al., 2000; Cabral-Cano et al., 2008) y la frecuencia de los eventos de fracturamiento así como su gravedad está en aumento.

2.1. ORIGEN DEL CERG

En el año de 2007, ocurrió un colapso del suelo de grandes proporciones en la colonia de San Lorenzo Tezonco, situada al sur del territorio de Iztapalapa. Ante la gravedad de la situación, el gobierno municipal establece un vínculo de colaboración con la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) a través del Centro de Geociencias (CGEO). Bajo el esquema de colaboración del gobierno y la institución académica, es creado el Centro de Evaluación de Riesgo Geológico de Iztapalapa (CERG), diseñado con métodos de trabajo específicos que responden a las necesidades del municipio. Durante cuatro años de operación, el CGEO ha capacitado al personal técnico del CERG en la aplicación de métodos de prospección geofísica, y caracterización de suelos, así como en el análisis y correlación de datos.

Las evaluaciones que se desarrollan en el CERG, están orientados a lograr un mejor entendimiento de las condiciones locales de deformación en diferentes zonas de la demarcación. Con el trabajo sistemático realizado se analiza, dentro del contexto geológico de Iztapalapa, la geometría de las fracturas, sus condiciones de generación y propagación, y sus efectos en la infraestructura urbana, con el fin de obtener elementos para el diseño de políticas públicas enfocadas a la mitigación del riesgo.

Los resultados obtenidos por el CERG, proporcionan elementos fundamentales para la toma de decisiones del área de Viviendas e Inmuebles en Riesgo de la Coordinación de Protección Civil, instancia encargada de emitir dictámenes sobre el riesgo estructural de las construcciones al que están sometidos los habitantes. Las funciones del CERG y del área de Viviendas e Inmuebles en Riesgo, están en el marco del programa de gobierno "Habita sin Riesgo", que promueve la disminución de los peligros geológicos en las zonas de mayor vulnerabilidad de la demarcación.

2.2. SISTEMA DE TRABAJO

El CERG está conformado por 4 áreas de trabajo:

- Cartografía y Topografía,
- Geología y Geofísica,
- Laboratorio de Caracterización de Suelos
- Sistema de Información Digital (SID).

La primera etapa en el sistema de trabajo, comprende el levantamiento cartográfico de la traza de las fracturas en

superficie. Se analizan sus trayectorias, densidad y geometría como primer paso para la definición de los mecanismos de fracturamiento.

La prospección geofísica se realiza mediante Radar de Penetración Terrestre (Carreón-Freyre y Cerca, 2006) y Sísmica de Ondas Superficiales. La integración de estos dos métodos permiten identificar las estructuras del subsuelo hasta una profundidad de 80 metros, así como discontinuidades en los materiales geológicos.

Esta información es correlacionada con registros litológicos de pozos de extracción de agua. En algunos casos, se analizan muestras de suelos que han sido obtenidas en excavaciones hechas para la reparación de redes hidráulicas afectadas por los desplazamientos del suelo, o mediante sondeos geotécnicos realizados en sitios selectos.

La información generada, es administrada mediante una base de datos estructurada llamada Sistema de Información Digital (SID) y vertida a un Sistema de Información Geográfica, mediante el cual se realizan diversos procesos de análisis espacial y correlación de múltiples variables. La cartografía es integrada al Atlas Delegacional de Peligros, en el capítulo de Riesgos Geológicos. La información puede ser consultada en los reportes anuales del Centro de Geociencias, UNAM (2007, 2008, 2009, 2010), disponibles en el CEREG.

El CEREG trabaja en 2 vertientes, la primera, enfocada a la investigación, generación y procesado de datos, que son aplicados para la determinación de mecanismos de fracturamiento que afectan diversas zonas de la demarcación. La segunda vertiente, corresponde a la atención de solicitudes que realizan los ciudadanos ante las autoridades municipales, con el fin de que la administración local realice evaluaciones de riesgo geológico en sus barrios, pueblos o colonias y de esta manera, tomar las medidas necesarias para la mitigación de los peligros.

3 POLIGONOS DE ACTUACIÓN

Con base en la información generada y analizada por el CEREG, el territorio de Iztapalapa se ha subdividido en 9 polígonos de actuación (Figura 2), los cuales están diferenciados entre sí por el mecanismo predominante de fracturamiento presente en cada uno de ellos.

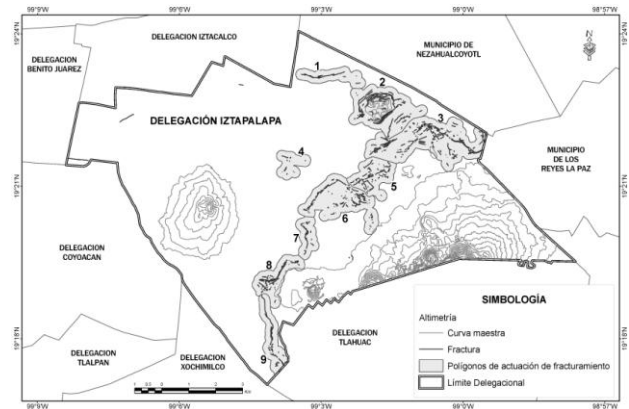


Figura 2. Distribución de los 9 polígonos de actuación

Los mecanismos hasta ahora identificados en la planicie lacustre, están asociados a los contactos entre materiales de comportamiento mecánico diferente, como tobas y arcillas, arcillas y suelos orgánicos, generando deformación con desplazamiento principalmente vertical. En la zona del Peñón del Marques el mecanismo de deformación predominante es un deslizamiento gravitacional activo que presenta diferencias en los flancos sur y norte con desplazamientos verticales y horizontales (Cerca et al., 2010). En San Lorenzo Tezonco el fracturamiento se asocia con rasgos estructurales de orden mayor en el subsuelo, que ponen en contacto materiales de comportamiento mecánico contrastante (arcillas y bloques de roca volcánica) con la posible presencia de espacios vacíos de dimensiones importantes.

3.1 CASOS RELEVANTES DE EVALUACIONES DE RIESGO GEOLÓGICO EN POLÍGONOS DE ACTUACIÓN.

3.1.1 Polígono de Actuación San Lorenzo Tezonco

El polígono de actuación San Lorenzo Tezonco (Figura 3), es considerado de alto riesgo debido a que esta zona se encuentra sobre un contacto entre materiales con propiedades mecánicas altamente contrastantes. La inestabilidad en esta zona se ha manifestado de manera continua desde hace más de 20 años. En julio de 2007, durante la época de lluvias, ocurrió un colapso que causó la pérdida de una vida humana.

En este polígono de actuación, se han analizado cuatro problemáticas específicas: la estabilidad estructural de los edificios de dos escuelas públicas, dos edificios de la Unidad Habitacional Benito Juárez y la viabilidad de operación del ducto de Petróleos Mexicanos (PEMEX) que conduce hidrocarburos y atraviesa la zona de fracturas del suelo. Este ducto, en julio de 2007 sufrió una ruptura a causa de los movimientos diferenciales del terreno y ocurrió un derrame de miles de litros de gasolina en el subsuelo, que posteriormente fueron recuperados casi en su totalidad.

Una característica importante en el fracturamiento de la zona de San Lorenzo Tezonco, es la dimensión de las fracturas reportadas. La profundidad de su apertura y extensión en superficie indican que el desequilibrio mecánico que les dio origen no es un proceso de pequeña escala, escala superficial o puramente geotécnico.

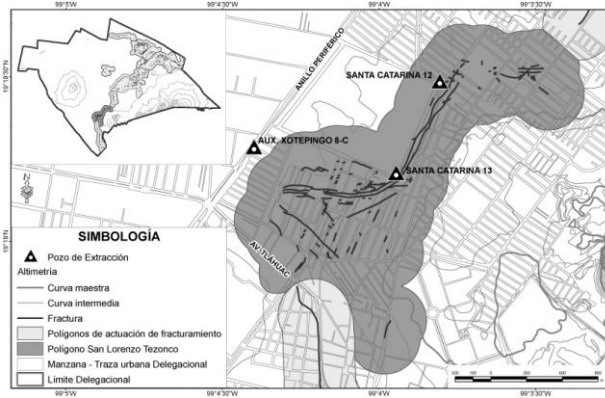


Figura 3. Polígono de actuación de San Lorenzo Tezonco

De acuerdo con las observaciones de campo y con los resultados de la prospección geofísica el fracturamiento que afecta a San Lorenzo Tezonco, se relaciona con una zona de contacto abrupto entre material lacustre y bloques de basalto y roca piroclástica asociados con el aparato de escoria volcánica que se localiza al suroriente, volcán Yuhualixqui. Estos bloques dimensiones variables se desplazan de manera desarticulada por debajo de la mancha urbana de San Lorenzo Tezonco.

La interpretación de los registros litológicos del pozo de bombeo Santa Catarina 12 (Figura 4), sugiere que los bloques de basalto sobreyacen a una secuencia de material piroclástico granular no consolidado, de tamaño de grava, lo que incrementaría su inestabilidad. El material piroclástico delimita una la secuencia lacustre que se extiende hacia el norponiente. Los sondeos geotécnicos profundos en esa zona reportan secuencias arcillosas de color verde olivo de gran espesor, lo que indica un ambiente lacustre reductor y de profundidad importante. El contacto entre ambas unidades se observa acentuado por materiales piroclásticos arenosos de menor resistencia que dirigen la propagación del fracturamiento hacia la superficie. En este pozo se observa que por encima de las unidades mencionadas y cubriendo el contacto se reportan secuencias arcillosas, limo-arcillosas y arcillo arenosas de color café que indican condiciones lacustres someras en tiempos más recientes. Estas secuencias son generalmente son el objeto de los estudios geotécnicos.

En todos los pozos se observa que las secuencias de roca descansan sobre depósitos de arena y grava que probablemente constituyen la unidad acuífera que se está explotando actualmente en la zona. La intensificación de la extracción de agua subterránea podría alterar la estructura del material granular y

desestabilizar las secuencias rocosas que se localizan entre los 70 y 75 m de profundidad.

En resumen, la inestabilidad que provoca la deformación en San Lorenzo Tezonco se localiza a profundidades mayores a los 50 m, de acuerdo al registro litológico del pozo Santa Catarina 12, Auxiliar Xotepingo 8c, Santa Catarina 12 Nuevo (Figura 4) y a los resultados de los perfiles de sismica de ondas superficiales.

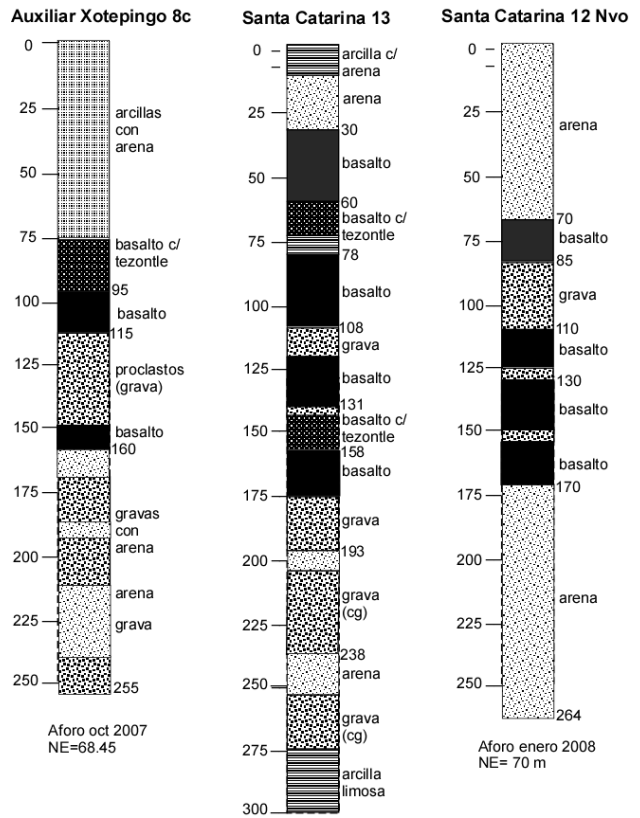


Figura 4. Registros litológicos de los pozos Santa Catarina 12, Auxiliar Xotepingo 8c, Santa Catarina 12 Nuevo.

3.1.2 Polígono de Actuación Peñón del Marques

La zona de la Delegación con la mayor deformación reportada se encuentra alrededor del Peñón del Marques (figura 5). Este es un edificio volcánico de forma elipsoidal y asimétrica (tiene un relieve más suave hacia su flanco sur), el cual está constituido por bloques volcánicos que se sostienen entre sí, con depósitos piroclásticos predominantemente cenizas y tobas que le dan cierta estabilidad a la estructura general.

Una de las características principales de la estructura volcánica del peñón del Marqués, es que está constituida por bloques de material piroclástico, que están soportados por materiales granulares finos poco

cohesivos, que pierden su estructura cuando se someten a vibración continua generando colapso y socavaciones cuando hay infiltraciones de agua. Aunada a esta inestabilidad mecánica se debe agregar el problema de los cortes verticales en los antiguos frentes de ataque de canteras, lo que hace esta zona particularmente susceptible al deslizamiento de bloques y flujo de derrubios. Cabe remarcar que el tránsito continuo de vehículos pesados en esta zona, genera las vibraciones necesarias para la desestabilización de la masa volcánica

Para entender las causas de los desplazamientos en el Peñón del Marques es necesario entender los patrones regionales de la deformación asociada a los hundimientos generalizados en la Delegación y su relación con los mecanismos que producen y localizan las fracturas. Aunque el mecanismo disparador del fracturamiento sea la pérdida de la presión de poro y el proceso de consolidación que se activa debido a la extracción extensiva de agua subterránea (Aguilar-Pérez et al., 2006), la relación entre abatimiento y deformación no es directa.

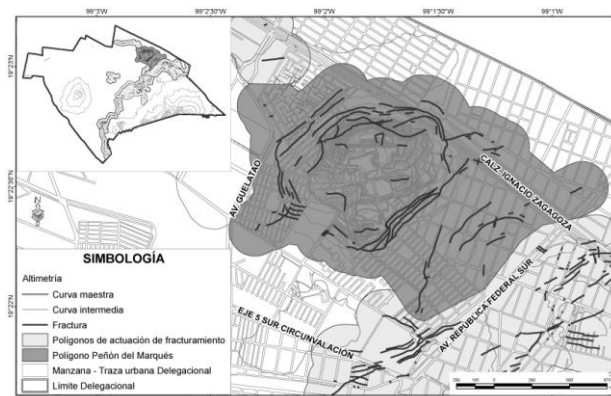


Figura 5. Polígono de Actuación Peñón del Marqués

Se ha documentado que el contacto abrupto entre las rocas volcánicas y el relleno sedimentario facilitan la concentración de la deformación alrededor del Peñón del Marques. Las observaciones realizadas por el CERG, muestran que el material que concentra la deformación es una toba pumicítica que pierde fácilmente su estructura al contacto con el agua (material colapsable) y se distribuye en la periferia del Peñón del Marques. Con base en la información obtenida durante el trabajo de campo y mediante el registro de perfiles de radar de penetración terrestre, se considera que este material se asocia con los sitios más afectados por las fracturas en esta zona (Figura 6).

La calle Luis García ubicada en la ladera este del Peñón, es representativa de la deformación asociada al proceso del deslizamiento activo en este flanco. Esta sección (figura 6) muestra una topografía caracterizada por una pendiente en la parte inicial, un hundimiento en la parte media y un alto topográfico hacia el final del perfil. En la zona con mayor pendiente del perfil se registraron fracturas de alto ángulo consistentes con las observadas en campo. Estas fracturas tienen

desplazamientos tanto verticales como horizontales. La fractura con mayor desplazamiento se localiza en la parte alta del perfil. La litología en la zona de pendiente está formada por bloques de roca y toba. La zona intermedia del perfil presenta el mayor hundimiento y corresponde al contacto litológico con la secuencia arcillosa lacustre se encuentra en esta zona. En el flanco oeste del levantamiento topográfico al frente se observan fracturas con un ángulo de inclinación menor y con sentido opuesto.

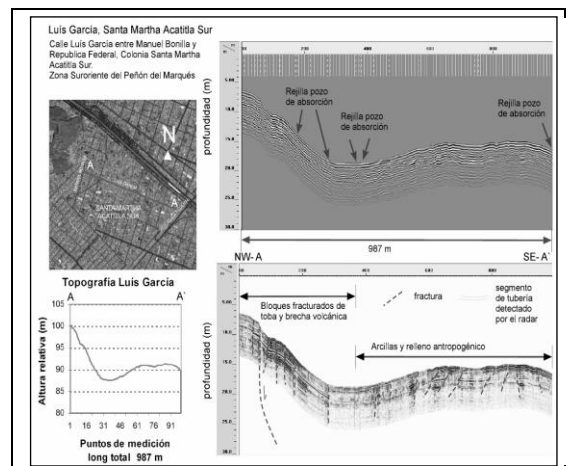


Figura 6. Ladera este del Peñón del Marques, calle Luis García.

En resumen, la relajación gravitacional del edificio volcánico fue disparada por la subsidencia del terreno y esta deformación se acomoda en desplazamiento de los flancos sobre un plano de despegue de bajo ángulo y por acortamiento observado en las partes distales del perfil (Cerca et al., 2010).

3.1.3 Polígono de actuación Ermita–Santa Martha Acatitla

En febrero de 2010, ocurrió un desplazamiento vertical a lo largo de una fractura en la zona NE del polígono de actuación Ermita–Santa Martha Acatitla (Figura 7), del cual resultaron seriamente afectadas 3 casas, ocasionando rupturas en los firmes, muros y lozas. El CERG realizó perfiles de sismica de ondas superficiales, perfiles de Radar de Penetración Terrestre RPT, levantamiento cartográfico de fracturas y la recolección de 1 muestra de suelo. Con la información recopilada, se realizó una evaluación de riesgo.

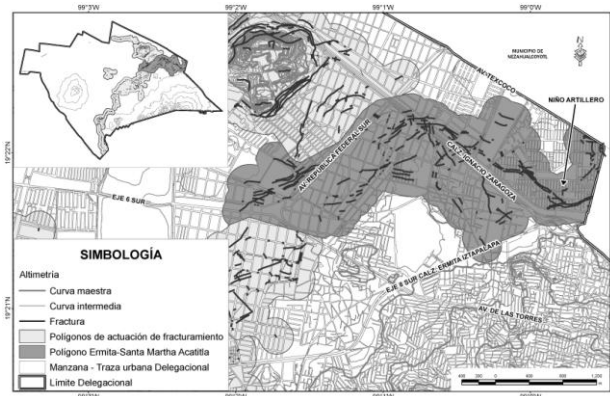


Figura 7. Polígono de actuación Ermita-Santa Martha Acatitla. Se muestra la zona de Niño Artillero donde fue realizado el estudio.

De acuerdo a los resultados obtenidos se propone que en esta zona los materiales se fracturan por deformación diferencial. En la figura 8, se muestra el mecanismo propuesto. En los esquemas presentados sobre cada perfil sísmico se muestran los desplazamientos observados en superficie. Las diferencias de velocidad en los perfiles registran la presencia de intercalaciones de rocas volcánicas de la Sierra de Santa Catarina entre el material granular. El abatimiento del agua subterránea y la infiltración son factores disparadores de la deformación.

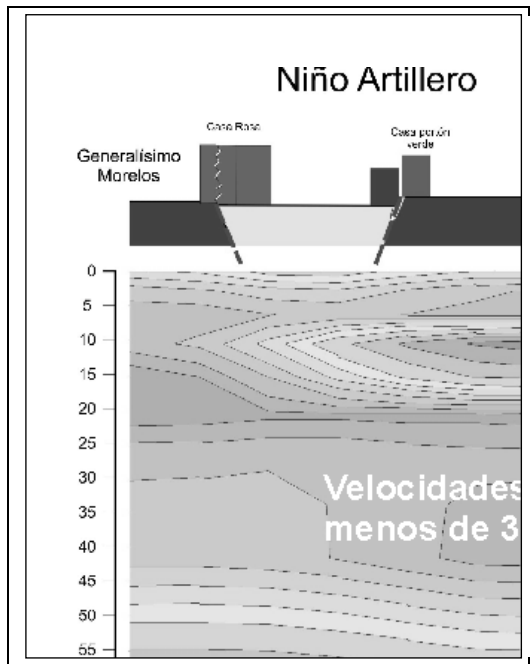


Figura 8. Secciones sísmicas en el polígono Ermita-Santa Martha Acatitla. Las velocidades bajas corresponden a materiales fluvio-lacustres y suelos compresibles, mientras que las velocidades medias y altas corresponden a materiales "rígidos", en la zona son generalmente rocas volcánicas.

4 INSTRUMENTACION

El CERG ha desarrollado con la participación del Centro de Geociencias de la UNAM y el Centro de Investigaciones en Óptica, CIO, A.C., un prototipo de estación de monitoreo de la deformación sobre la traza de las fracturas. El objetivo de estas estaciones, es la de generar datos precisos y de forma continua, sobre las magnitudes de las deformaciones generadas por la subsidencia del terreno.

Con los datos obtenidos en estas estaciones de monitoreo, se pretenden generar modelos con el fin establecer relaciones entre los movimientos del suelo y otros factores como pueden ser fuertes precipitaciones, temperaturas extremas e incluso sismos.

La colonia Jacarandas que se encuentra en el Polígono de Actuación Santa Cruz Meyehualco (Figura 9), fue seleccionada para instalar el prototipo de instrumentación, ya que cumple con las características deseadas de contraste mecánico del suelo, densidad de fracturamiento y desplazamiento de las fracturas.

La instalación se desarrollo mediante las siguientes actividades:

- Cartografía a detalle de las fracturas de toda la Colonia Jacarandas.
- Colección de muestras de subsuelo en la zanja donde se colocó el prototipo de instrumentación en superficie, dicha zanja es perpendicular a la fractura, con la finalidad de realizar una caracterización física y mecánica del suelo en laboratorio.
- Levantamiento de perfiles multifrecuencia de Radar de Penetración Terrestre (RPT).
- Levantamiento topográfico a detalle con nivel electrónico y estación total.

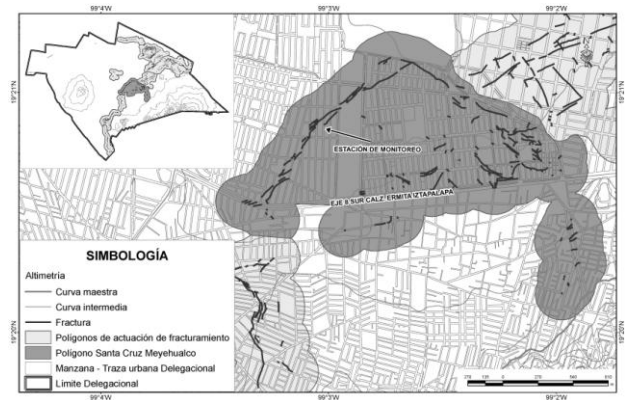


Figura 9. Polígono de actuación de Santa Cruz Meyehualco

Actualmente se diseña una red de Estaciones de Monitoreo, que será de gran utilidad para generar datos sobre el comportamiento del suelo a lo largo del tiempo, fundamentales para el establecimiento de medidas preventivas y de mitigación, en el marco de la Gestión

Integral de Riesgos que se desarrolla en la Delegación Iztapalapa.

4 PERSPECTIVAS

El CERG busca incidir en el cambio de las políticas de uso de suelo y manejo de los recursos hídricos que se aplican en la Ciudad de México, ya que ante la falta de otras fuentes de abastecimiento, se proyecta continuar con la extracción de agua mediante bombeo de pozos profundos. Si se continúa con la explotación intensa de los acuíferos, la problemática de subsidencia de la Ciudad de México irá en aumento y ocasionará pérdidas económicas a los gobiernos locales y federales.

Es indispensable buscar el aprovechamiento de aguas pluviales y el manejo integral de cuencas en la zona oriente de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Ante la gravedad del problema que significa la subsidencia y el fracturamiento del subsuelo, el gobierno de Iztapalapa, ha implementado esquemas de apoyo a las familias de bajo nivel económico, que consisten en programas piloto de sustitución de viviendas en alto riesgo y reestructuración de viviendas en riesgo medio. Iztapalapa es la entidad más densamente poblada del país y debido a la falta de espacio, la sustitución de viviendas se planea desarrollar mediante innovaciones en técnicas constructivas que permitan aprovechar, en la medida de lo posible, el mismo terreno afectado por fracturas. En estos programas, el CERG participa activamente para la evaluación de los mecanismos de fracturamiento, diseño de rellenos en los suelos afectados y monitoreo permanente de la evolución de la deformación.

4 CONCLUSIONES

El CERG ha sido diseñado con la capacidad de ser consultivo, lo que implica que el conocimiento generado debe de ser aplicado en el diseño de medidas de mitigación y prevención de daños futuros. El fracturamiento en la DI puede ser descrito por diferentes mecanismos que predominan en los polígonos de actuación. En general, las fracturas se forman por subsidencia gradual y compactación diferencial. Las discontinuidades previas juegan un papel importante. En este trabajo se presenta la metodología para la evaluación de la vulnerabilidad física de la DI al fracturamiento. Uno de los valores agregados más importantes del CERG es la creación de una cultura de co-existencia con el fenómeno del fracturamiento, el cual, desafortunadamente es persistente e irreversible en la DI.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aguilar-Pérez, L. A., Ortega-Guerrero, M. A., Lugo-Hubp, J. & Ortiz-Zamora, D. C. 2006. Análisis numérico acoplado de los desplazamientos verticales y generación de fracturas por extracción de agua subterránea en las proximidades de la Ciudad de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 23(3), 247–261.
- Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Miralles-Wilhelm, F., Díaz-Molina, O., Sánchez-Zamora, O. & Carande, R. E. 2008. Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City. *GSA Bulletin* 120(11-12), 1556–1566, doi: 10.1130/B26001.1
- Cabral-Cano, E., Lugo-Hubp, J., Ortega-Guerrero, M. A., Duran-Carmona, V. 2000. Análisis de fallas y fracturas en la Delegación Iztapalapa: Etapa 1. Reporte de estudio inédito, Universidad Nacional Autónoma de México, 104 pp.
- Carreón-Freyre, D., & Cerca, M. 2006. Delineating the near-surface geometry of the fracture system affecting the valley of Queretaro, Mexico: Correlation of GPR signatures and physical properties of sediments. *Near Surface Geophysics*, EAGE (European Assoc. of Geoscientists and Engineers). 4(1): 49-55.
- Centro de Geociencias UNAM. 2007, 2008, 2009, 2010. Serie de Informes de actividades de los convenios de colaboración Iztapalapa-CGEO “Análisis de la deformación del territorio de la Delegación Iztapalapa para la evaluación del riesgo geológico” y “Análisis de los mecanismos de fracturamiento del subsuelo que afectan a la Delegación Iztapalapa, utilizando una base de datos estructurada para la toma de decisiones”.
- Cerca, M., Carreón-Freyre, D. C. & Gutiérrez, R. 2010. Instability of the urbanized flank of El Peñón del Marques volcanic edifice and its relation to land subsidence in Mexico City. In Carreón-Freyre, D. C., Cerca, M., and Galloway, D. (eds). *Land Subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development IAHS Publ.* 339, 219-223
- Colegio de Arquitectos de la Ciudad de México (2004). Modificación del programa Delegacional de desarrollo urbano en Iztapalapa. México, D.F., Colegio de Arquitectos de la Ciudad de México A.C.: 119-130.
- Instituto Cartografico de Cataluña (ICC) Carte des environs de la ville de Mexico : pour l'histoire gen. des voyages. Any original: 1754. Descripción: 1 mapa. A la part inferior: Tom. XII, Num. 10. Registre: RM.244194. Tipus de recurs: Imatge. Matèria: Mapa
- Vázquez-Sánchez, E., y Jaimes-Palomera, R. 1989. Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28(2), 133-190.