

INTERACCIÓN SITIO-CIUDAD: EL EFECTO DE LA CIUDAD EN EL MOVIMIENTO DEL TERRENO EN EL VALLE DE MÉXICO

LEONARDO RAMÍREZ GUZMÁN,
MOISÉS G. CONTRERAS RUÍZ ESPARZA
Y MIGUEL A. CARRILLO LUCÍA

El movimiento del terreno ocasionado por sismos en la Ciudad de México (CDMX) presenta grandes amplificaciones e incrementos de duración en sitios ubicados en el antiguo lago, tomando como referencia las observaciones en la zona de lomas. Las variaciones anómalas mencionadas afectan fuertemente la demanda en estructuras, éstas, han sido objeto de estudio y debate. Sin embargo, no hay consenso en los mecanismos que explican su comportamiento. Aquí describimos de manera sucinta algunas de las fuentes potenciales del incremento relativo de la amplitud y las duraciones, con especial énfasis en la interacción de la ciudad con el subsuelo.

Los intentos por revelar las particularidades del campo de desplazamientos en la zona del lago causados por sismos han tenido éxito limitado. Los modelos unidimensionales y bidimensionales empleados para analizar el fenómeno, propuestos

durante los años ochenta y principios de los noventa del siglo XX, no reflejan la complejidad del Valle de México (VM). Chávez-García y Bard (1994) presentaron una revisión crítica de algunos mecanismos sugeridos para explicar el comportamiento dinámico del suelo en la capital, con lo cual, confirmaron que la presencia de las arcillas de baja velocidad es la causa principal de la amplificación observada con respecto a roca. Con relación a la elongación de la duración del movimiento intenso, los autores sugieren que no puede atribuirse sólo al material y apuntan al efecto regional -la generación de fases durante el trayecto de la fuente a la ciudad, que después se amplifican en el lago (Singh y Ordaz, 1993)- como uno de los factores más importantes. Posteriormente, Chávez-García *et al.* (1995) sugirieron que parte del incremento de la duración es generado por efectos tridimensionales en la estructura del VM y la contribución de las edificaciones de la mancha urbana, siendo esta última de interés para nuestra investigación.

Diferentes estudios analíticos, numéricos y experimentales han evaluado la influencia de la vibración de conjuntos de edificios en el movimiento de campo libre (e. g. Gueguen *et al.*, 2002; Wirgin y Bard, 1996; Isbilibroglu *et al.* 2015; Mengling *et al.*, 2011; Vishwahit, 2018 y referencias ahí mencionadas). Estas investigaciones han mostrado que las estructuras pueden inducir amplitudes importantes en sitios con suelos blandos cuyos periodos fundamentales coinciden con los de la estructura; inclusive, pueden afectar el campo libre a grandes distancias. En general, el problema se ha abordado utilizando

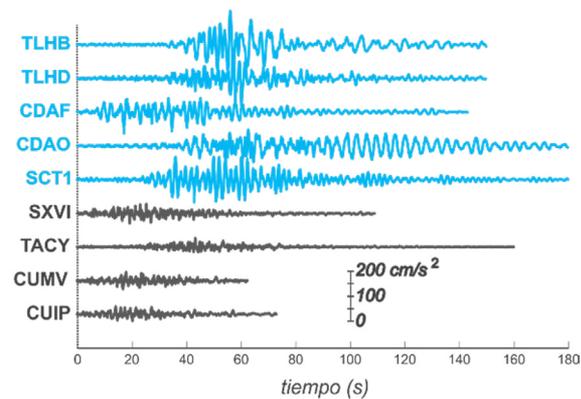
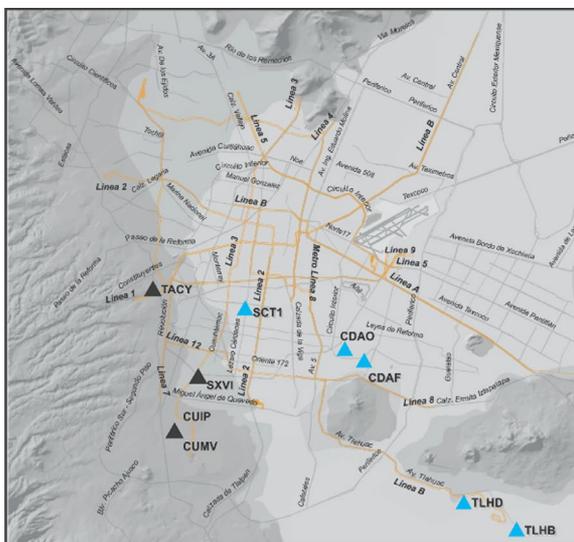


Figura 1. Amplificación e incremento de la duración de estaciones en la zona del lago (azul) con respecto a estaciones en roca (negro). Aceleración del sismo del 19 septiembre de 1985

pequeños conjuntos de edificios con distribuciones espaciales y formas regulares que no reflejan la complejidad de urbes como la Ciudad de México. Las conclusiones han sido limitadas y sólo pueden considerarse como particulares al caso en cuestión. En contraste, el modelo empleado en nuestra investigación, tanto del subsuelo como del inventario de edificaciones acopladas, contiene elementos esenciales para suponer que las conclusiones que se deriven serán válidas, pero que sin duda requerirán escrutinio basado en las observaciones.

Modelado numérico de la fuente a las estructuras

Con la finalidad de abordar el problema de interacción estructura-suelo-estructura de manera masiva, también conocido como interacción sitio-ciudad cuando se analizan un número grande de edificios, se han desarrollado y conjuntado infraestructura tanto física como de *software*, así como bases de datos e información geofísica y catastral para construir un modelo del Centro de México que tome en cuenta a la CDMX, con el detalle necesario para estudiar el movimiento debido a fuentes

sísmicas históricas o hipotéticas. Los componentes de la infraestructura mencionada son: 1) El modelo cortical y geotécnico del Centro de México y la CDMX; 2) El modelo de las estructuras de la CDMX y 3) Un código de elementos finitos lo suficientemente robusto para simular la propagación de ondas en medios altamente heterogéneos.

El modelo compuesto suelo-ciudad (ver figura 2) elemento fundamental de la investigación, es resultado de una tomografía de onda completa e información geotécnica y geofísica colectada para la capital del país (Juárez y Ramírez-Guzmán, 2016). Además, los edificios y viviendas se modelan empleando vigas de cortante con periodo fundamental igual a un décimo del número de pisos derivados de una conciliación de información entre el catastro y datos LIDAR. A pesar de ser esta última una aproximación muy gruesa, permite identificar el fenómeno de interacción de forma colectiva. Pruebas diversas sobre la bondad del ajuste entre observaciones y sismogramas simulados, nos indican que el modelo reproduce adecuadamente la duración y amplitud del movimiento ante sismos corticales, intra e interplaca, conocida la fuente sísmica.

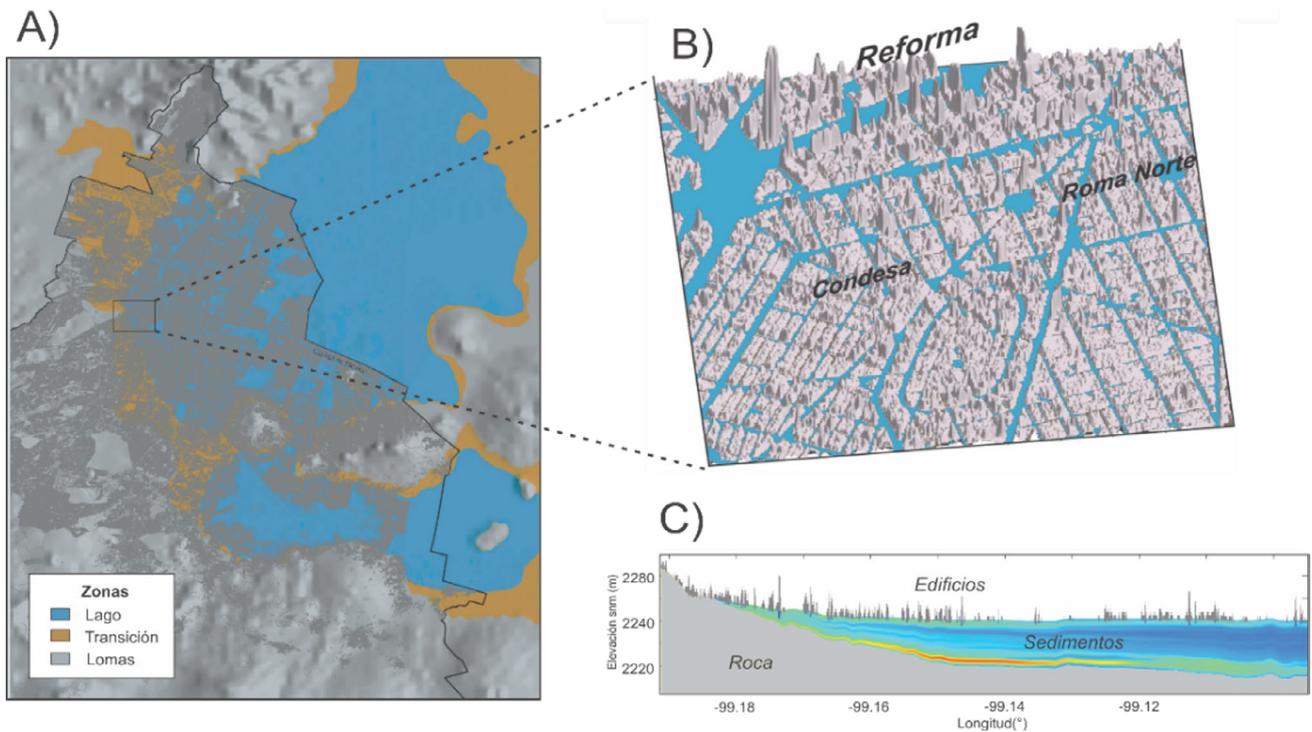


Figura 2. Modelo de la Ciudad de México. A) Valle de México y traza de los predios de la Ciudad de México. B) Modelo de Ciudad empleando vigas de cortante y C) Corte del modelo de velocidades y edificios empleados en la investigación

Interacción entre la ciudad y el subsuelo

Con el fin de elucidar la influencia de las estructuras en el movimiento de la zona del lago, se simularon dos casos de la propagación de ondas: 1) Campo libre, *i. e.* sin estructuras, 2) Incluyendo las poco más de 1.5 millones de estructuras de la ciudad (ver figura 3). La banda de frecuencia en la que los resultados son válidos va de 0 a 1.0 Hz. Se utilizó el sismo local Mw3.2 del 16 de julio de 2019, con epicentro ubicado al poniente de la capital. La fuente sísmica es ideal para aislar efectos de trayecto -que se podrían presentar en sismos corticales, intra e intraplaca más lejanos- que afectarían la interacción sitio-ciudad.

La figura 3 ilustra, en los dos casos simulados, la propagación de ondas en dos instantes (1 y 5 s). Se reporta el módulo de la velocidad al nivel de la superficie cercana a la fuente. Regionalmente, observamos pocas modificaciones del campo. Las primeras fases no se ven afectadas por la presencia de la ciudad; sin embargo, en un análisis más cuidadoso, podemos identificar cambios en el movimiento que es persistente en toda la zona del lago. Las figuras 3.e y 3.f permiten apreciar los cambios inducidos por el corredor Reforma de edificios,

ubicados en la zona de transición y del lago. Hay reducciones (e. g. sur de la colonia Anzures) y amplificaciones (cruces Reforma-Circuito Interior y al Reforma-Insurgentes) del movimiento atribuibles a los edificios.

La figura 4 muestra la historia de velocidad en puntos a lo largo de línea A-A' (ver figura 3). Las diferencias son evidentes tanto en amplitud como en duración. En las señales hacia el este de la línea A-A', la banda en la que se distribuye la energía es mucho más amplia cuando se incluye la ciudad; al parecer, los edificios con frecuencias fundamentales alrededor de 0.5 Hz, abundantes en el corredor Reforma, contribuyen de manera importante.

La presencia de la ciudad en el modelo, en general, provoca que la energía se distribuya en bandas más anchas de frecuencia considerando sólo el campo libre. Lo anterior concuerda con la expectativa de que los edificios se comporten como difractores. Asimismo, en algunos casos particulares, no presentados en este documento, se observa la canalización de la energía o guías de ondas generada por unidades habitacionales con orientaciones de plantas y alturas regulares, entre otros fenómenos de propagación, cuya comprensión nos auxiliará en la cuantificación del efecto de la urbe en el movimiento.

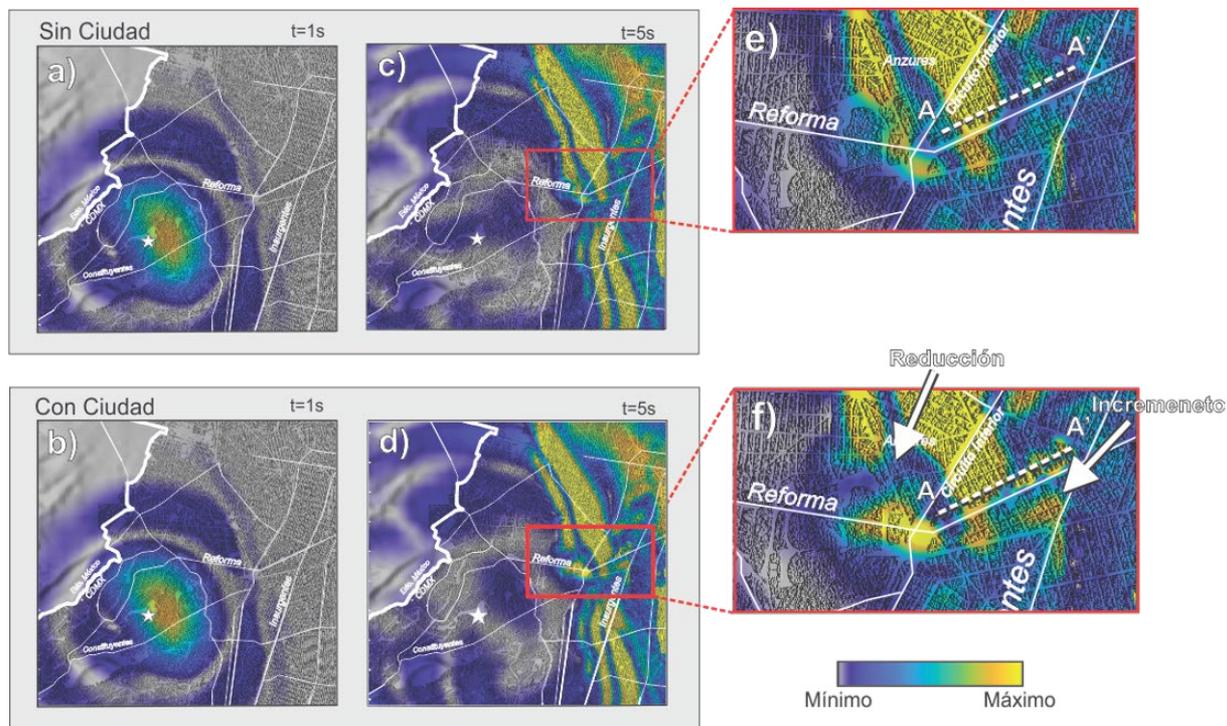


Figura 3. Simulación del sismo del 16 de julio de 2019 (estrella). A y B corresponden al módulo de la velocidad horizontal, el tiempo 1 s en ausencia y presencia la ciudad, respectivamente. C y D similar a A y B para el tiempo 5 s. E y F ampliación de C y D

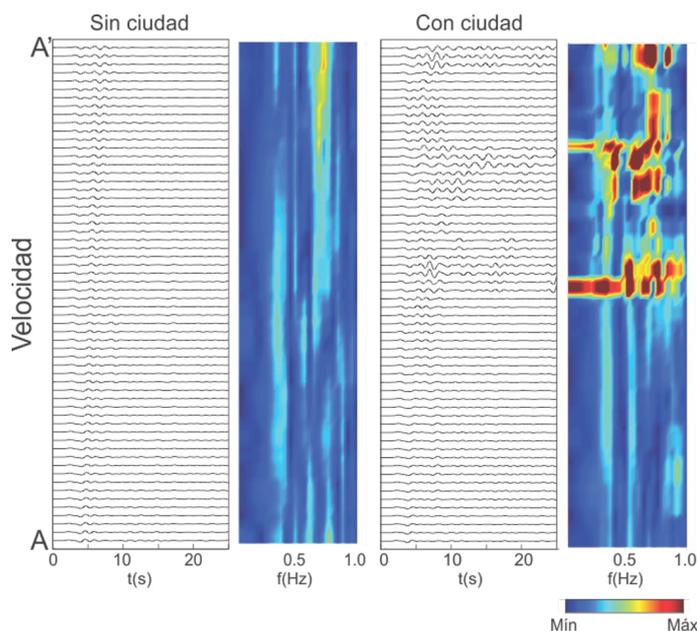


Figura 4. Comparación de la velocidad E-W en las estaciones A-A'. La posición de la línea A-A' se muestra en la figura 3

Discusión y conclusiones

En general, las edificaciones e infraestructura se planean, analizan y ejecutan considerando una interacción muy limitada con su entorno; sin embargo, la realidad es mucho más compleja. Se han propuesto modelos validados con evidencia empírica en un buen número de investigaciones sobre la

importancia y la influencia colectiva de las edificaciones en el campo de desplazamientos inducido por sismo, que en algunas situaciones puede ser adversa para las estructuras. Aquí mostramos resultados preliminares sobre la influencia de las estructuras en el campo de movimiento del suelo de la CDMX, la cual, puede ser muy importante tanto en términos de amplitudes como de duración.

Referencias

- Chávez-García, F. J. y P. Y. Bard (1994). Site effects in Mexico City eight years after the September 1985. Michoacan earthquakes, *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 13, 4, 229-247.
- Chávez-García, F. J.; J. Ramos-Martínez y E. Romero-Jiménez (1995). Surface-wave dispersion analysis in Mexico City, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, 1116-1126.
- Guéguen, P.; P. Y. Bard y F. J. Chávez-García (2002). Site-city seismic interaction in Mexico City-like environments: An analytical study, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 794-811.
- Isbiloglu, Y.; R. Taborda y J. Bielak (2015). Coupled Soil-Structure Interaction Effects of Building Clusters during Earthquakes, *Earthquake Spectra*, 31, 1, 463-500.
- Juárez, A. y L. Ramírez-Guzmán (2016). Adjoint-wavefield tomography of Southcentral Mexico, *GSA Annual Meeting*, Denver, Colorado, EUA.
- Kawase, H. y K. Aki (1989). A study on the response of a soft basin for incident S, P, and Rayleigh waves with special reference to the long duration observed in Mexico City, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 79, 5, 1361-1382.
- Lou, M.; H. Wang; X. Chen y Y. Zhai (2011). Structure-soil-structure interaction: Literature review, *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 31, 12, 1724-1731.
- Singh, S. y M. Ordaz (1993). On the Origin of Long Coda Observed in the Lakebed Strong-motion Records of Mexico City. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 1298-1306.
- Anand, Vishwajit y S. R. Satish Kumar (2018). Seismic soil-structure interaction: a state-of-the-art review, *Structures*, 16, 317-326.
- Wirgin, Armand y Pierre-Yves Bard (1996). Effects of buildings on the duration and amplitude of ground motion in Mexico City, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 3, 914-920.