

# FALLAS DE LICUACIÓN DE SUELOS INDUCIDAS POR EL SISMO DE TEHUANTEPEC DEL 7 DE SEPTIEMBRE DE 2017 ( $M_w$ 8.2) EN LA CIUDAD DE COATZACOALCOS, VERACRUZ, MÉXICO

Juan Antonio Guzmán Ventura<sup>(1)</sup>, Francisco Williams Linera<sup>(2)</sup>, Guadalupe Riquer Trujillo<sup>(2)</sup>, Alejandro Vargas Colorado<sup>(2)</sup> y Regino Leyva Soberanis<sup>(2)</sup>

## RESUMEN

En este trabajo se presenta una revisión de 21 viviendas, que resultaron dañadas por licuación de suelos inducido por el sismo del 7 de septiembre de 2017 ( $M_w$  8.2), en la ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz, México. Para tal efecto, se ejecutaron 5 sondeos de penetración estándar (SPT) con el objetivo de determinar las propiedades geotécnicas de los sitios donde se presentaron los mayores daños, así mismo, la aceleración máxima del suelo que se presentó durante el evento sísmico se estimó usando las técnicas EHVSR y MHVSR, para suprimir o estimar efectos de sitio en 5 puntos localizados en la zona de estudio. Por último, la vulnerabilidad a la licuación de los estratos arenosos se determinó por el método empírico simplificado propuesto por Seed e Idriss (1971) y modificado por Youd, et al. (2001).

**Palabras clave:** sismo; aceleración máxima del suelo; EHVSR (Earthquake Horizontal to Vertical Spectral Ratio); MHVSR (Microtremor Horizontal to Vertical Spectral Ratio); licuación de suelos

## SOIL LIQUEFACTION FAILURE IN COATZACOALCOS, VERACRUZ (MEXICO) AFTER THE TEHUANTEPEC EARTHQUAKE ( $M_w$ 8.2) OF SEPTEMBER 7<sup>th</sup> 2017

## ABSTRACT

This paper consists in a review of 21 homes damaged due to liquefaction of soils after the September 7<sup>th</sup>, 2017 earthquake ( $M_w$  8.2) in the city of Coatzacoalcos, Veracruz in Mexico. For this purpose, five standard penetration tests (SPT) were carried out to determine the geotechnical properties of the site where the greatest damage occurred. Additionally, the maximum ground acceleration during the seismic event was estimated using EHVSR and MHVSR techniques, in order to suppress or estimate the site effects at 5 points located in the study area. Finally, liquefaction vulnerability of sandy strata was determined by the simplified empirical method proposed by Seed and Idriss (1971) and modified by Youd et al. (2001).

**Keywords:** earthquake; maximum soil acceleration; EHVSR (Earthquake Horizontal to Vertical Spectral Ratio); MHVSR (Microtremor Horizontal to Vertical Spectral Ratio); soil liquefaction

Artículo recibido el 25 de julio de 2018 y aprobado para su publicación el 3 de julio de 2020. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

<sup>(1)</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Avenida Universidad Km 7.5, C.P. 96538, Coatzacoalcos, Veracruz. México, [juguzman@uv.mx](mailto:juguzman@uv.mx)

<sup>(2)</sup> Instituto de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Avenida S.S Juan Pablo II s/n, Fraccionamiento Costa Verde, C.P. 94294, Boca del Río, Veracruz. México, [franciscowilliamslinera@yahoo.com.mx](mailto:franciscowilliamslinera@yahoo.com.mx)

## INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, la ocurrencia de sismos en México, han dejado cuantiosos daños materiales y la irreparable pérdida de miles de vidas humanas. Son fenómenos naturales que nada podemos hacer para evitarlos y mucho menos predecirlos, por lo cual la sociedad debe de habituarse a convivir con ellos y dentro de lo posible, estar preparados para mitigar sus potenciales daños. Precisamente uno de estos sismos, se presentó el 7 de septiembre de 2017 a las 23:49:17 horas del centro de México (04:49:17 UTC), con magnitud de 8.2, epicentro localizado a 140 km al suroeste de Pijijiapan, en el Estado Mexicano de Chiapas, a una latitud de 14.76° N y longitud -94.10° W, según lo reportó el Servicio Sismológico Nacional (SSN).

En el Estado Veracruz, los efectos dañinos generados por este evento sísmico, se apreciaron en los municipios sureños de Coatzacoalcos, Cosoleacaque, Hidalgotlán, Jáltipan, Minatitlán y Texistepec, lo que obligó a la Secretaría de Gobernación ha emitir la declaratoria de desastre natural para estos 6 municipios (DOF, 20 de septiembre 2017). De estos, el municipio con mayores reportes de daños fue Coatzacoalcos, donde viviendas de uno a dos niveles del sur de la ciudad, presentaron fallas asociadas al fenómeno de la licuación de suelos.

El objetivo principal de este trabajo es documentar los daños ocasionados a 21 viviendas por los asentamientos súbitos que se presentaron durante el sismo del 7 de septiembre de 2017 ( $M_w$  8.2) y que son atribuibles al fenómeno de la licuación de los estratos arenosos que cubren zonas importantes de la ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz, México, a partir de daños en viviendas y posterior evaluación del fenómeno mediante el criterio del National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER) publicado por Youd et al. (2001) en donde evalúa el fenómeno mediante un Factor de Seguridad. Así mismo se espera que esta información coadyuve en la elaboración en un futuro no muy lejano del Reglamento de Construcción de la ciudad.

Como se puede apreciar en la figura 1 el municipio de Coatzacoalcos se encuentra al sur del Estado de Veracruz, en México, a una latitud de 18.15° N y longitud -94.43° W, a una altura promedio de 10 metros sobre el nivel del mar (msnm). Limita al norte con el Golfo de México, al sur con los municipios de Nanchital, Cosoleacaque, Ixhuatlán del Sureste y Moloacán; al este con Agua Dulce y al oeste con Pajapan. La importancia del municipio, radica en que tiene una ubicación privilegiada con ventajas naturales y logísticas, lo cual permitió que se instalaran en décadas pasadas, una parte importante de la Petroquímica del país y recientemente para estimular su potencial de desarrollo el Gobierno de la República pretende construir el corredor interoceánico que conectaría el Golfo de México con el Océano Pacífico a partir de los puertos marítimos de Coatzacoalcos y Salina Cruz, este último ubicado en el estado de Oaxaca.

El sismo, que más daños ha generado a la infraestructura de la zona sur del estado de Veracruz, ocurrió el 26 de agosto de 1959, con una magnitud de 6.5, ubicado en el Golfo de México, con epicentro localizado a 35 km de la Ciudad de Coatzacoalcos a una latitud de 18.45° N y longitud -94.26° W, el cual generó rangos de aceleraciones superficiales de 0.07 a 0.2 de la gravedad (Cossío, 1960; Marsal, 1961). A este evento se le conoce como el sismo de Jáltipan, debido a los cuantiosos daños materiales y humanos generados a esta ciudad. Así mismo, en este evento, se documentó el primer caso de licuación de arenas en México (Marsal, 1961). En la ciudad de Coatzacoalcos, este sismo generó daños en lo que hoy es el Astillero Número Tres de la Secretaría de Marina–Armada de México y en los muelles de lo que antes se llamaba Puertos Libres, hoy Administración Portuaria Integral (figura 2). En el Astillero se presentaron daños en las cimentaciones de tres edificios, en los cuales se observaron asentamientos súbitos del orden de un metro en las columnas y en las paredes del taller mecánico. En la parte del muelle se observaron desplazamientos relativos horizontales de más de medio metro entre sus secciones. Estos daños fueron atribuidos al fenómeno de licuación parcial que se presentó en los mantos arenosos y limo –arenosos de esa zona (Marsal, 1961).

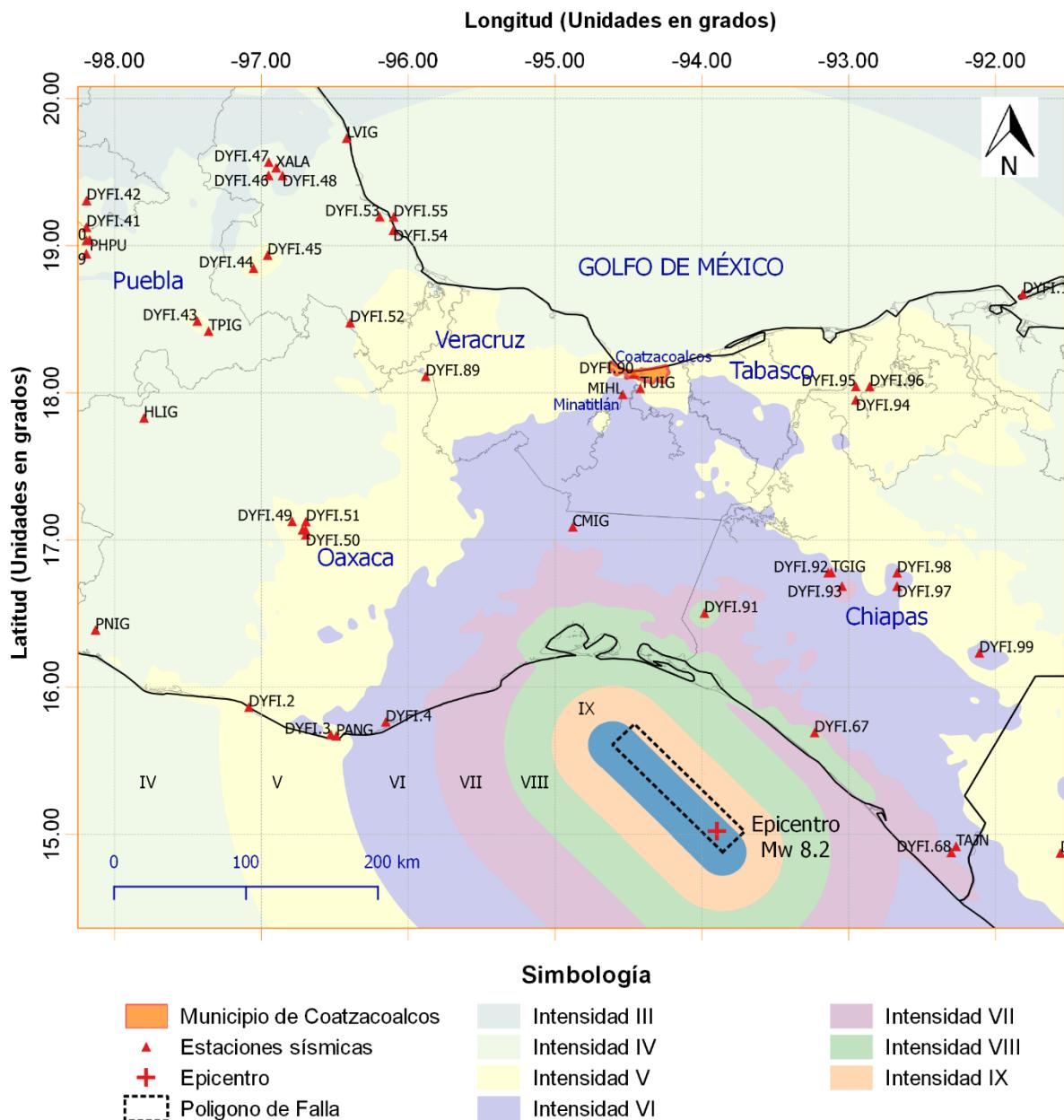


Figura 1. Ubicación de Coatzacoalcos, Veracruz, México, en el mapa de intensidades sísmicas de Mercalli Modificado, generado por el USGS del sismo del 7 de septiembre de 2017 ( $M_w=8.2$ , Intensidad Instrumental  $\approx$  IX)

Fuente: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000ahv0#map?ShakeMapStations=true&shakemapSource=us&shakemapCode=us2000ahv0>

## INFORMACIÓN GEOTÉCNICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

En la última zonificación geotécnica propuesta por Astudillo et al., (2010), se plantea que la zona urbana de la Ciudad de Coatzacoalcos está dividida en cuatro zonas geotécnicas. En esta zonificación como se observa en la figura 2, además de la zona geotécnica alta (ZGA) y la zona geotécnica baja (ZGB), como

en un principio lo propusieron Vieitez y Mosqueda (1970), incluye otras dos zonas; la zona geotécnica costera (ZGC) y la zona geotécnica de transición (ZGT).

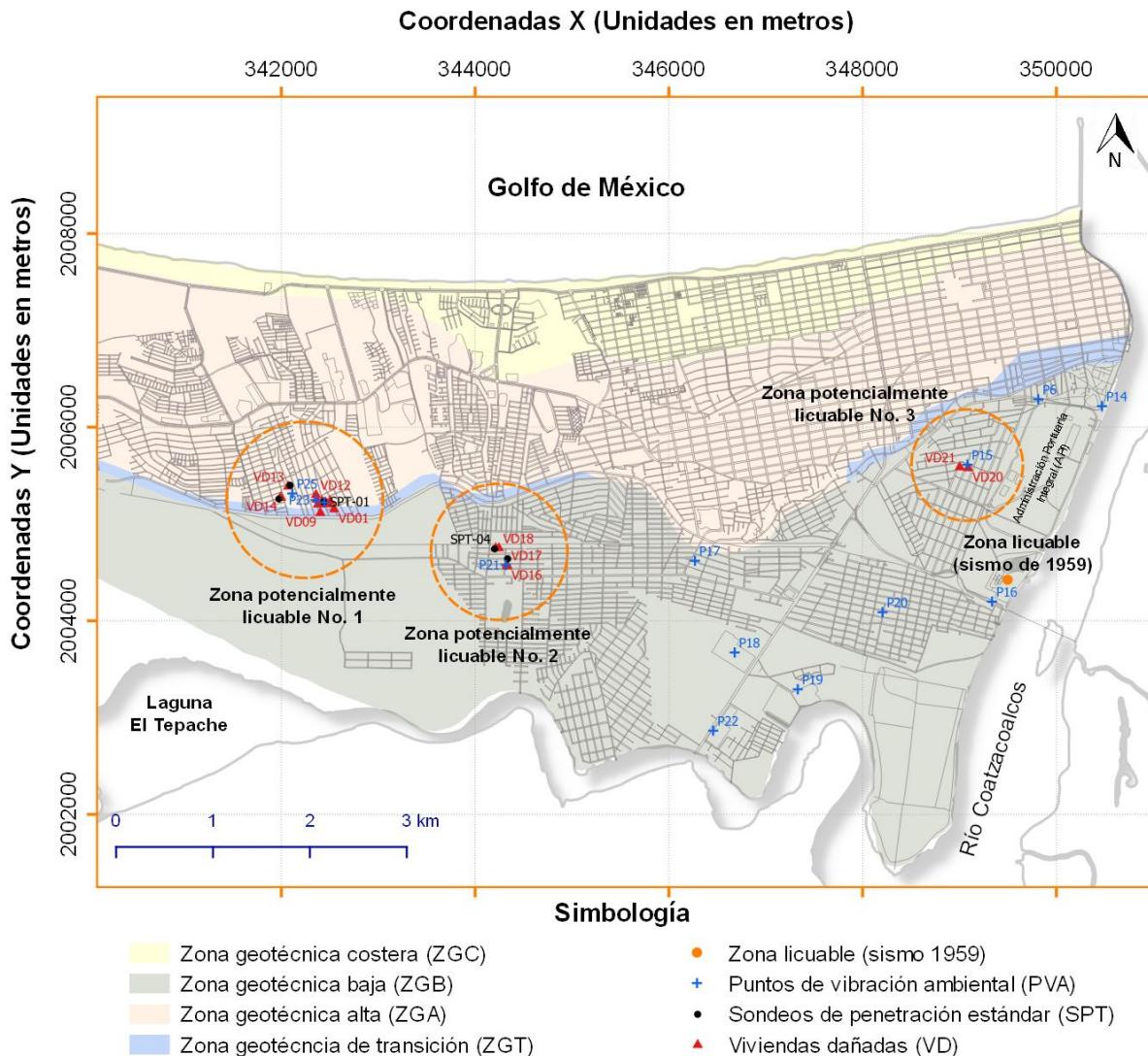
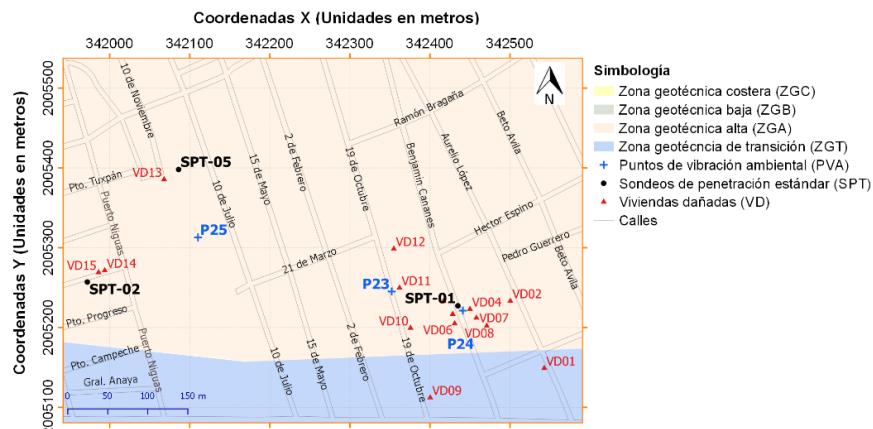
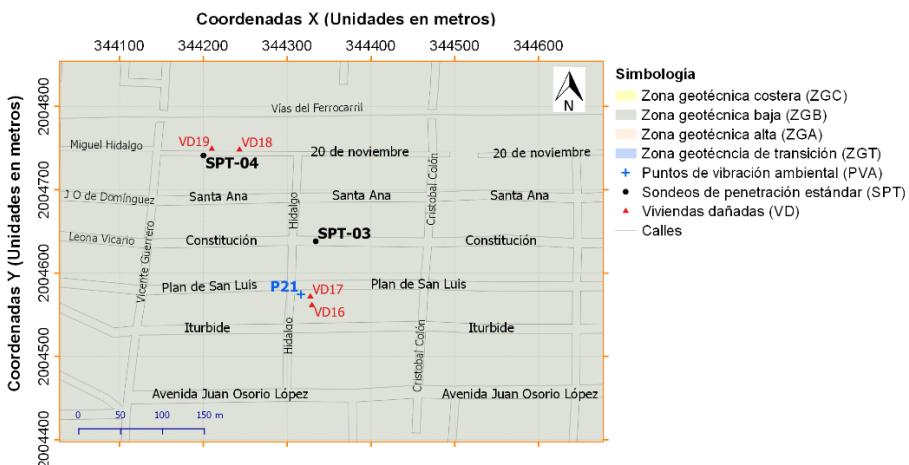


Figura 2. Mapa de zonificación geotécnica de la zona urbana de la Ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz, México, (Astudillo et al, 2010), así como la vista general de zonas potencialmente licuables debido al sismo del 7 de septiembre de 2017 ( $M_w$  8.2)

Cada una de estas zonas, presentan características geotécnicas propias, como, por ejemplo; la zona geotécnica costera (ZGC) y la zona geotécnica alta (ZGA), están conformadas por un potente estrato de arenas de dunas y médanos de origen eólico, con espesores que van de los 15 a 30 metros de profundidad. Es escasa la información de los suelos que subyacen a las arenas de esta zona; sin embargo, se infiere que subyacen suelos arcillosos y limosos de origen marino o aluvial.



a) Zona potencialmente licuable No. 1



b) Zona potencialmente licuable No. 2



c) Zona potencialmente licuable No. 3

Figura 3. Ubicación de SPT, PVA y viviendas dañadas (VD) en las tres zonas potencialmente licuables

La zona geotécnica de transición (ZGT), está formada por arenas de origen eólico igual que las dos zonas geotécnicas anteriores (ZGC y ZGA), diferenciándose, en el espesor inicial, el cual se reduce entre 4 y 12 metros. A partir de esta profundidad, se van alternando estratos cohesivos muy blandos o arenosos sueltos hasta llegar a los 20 metros de profundidad. Precisamente en estos estratos arenosos que se encuentran intercalados, se tienen características geotécnicas que pueden indicar vulnerabilidad a la licuación, así mismo empiezan a tomar relevancia los asentamientos generados por la consolidación de los estratos cohesivos blandos.

Por último, tenemos la zona geotécnica baja (ZGB), la cual tiene las mayores desventajas, debido a que está conformada por una secuencia de depósitos principalmente de origen fluvial (río Coatzacoalcos), constituidos en la parte superficial por un estrato de arenas de médanos (arenas limosas mal graduadas), de muy sueltas a media, con espesores que van de los 2 a 4 metros. A este suelo, le subyace un estrato de turba con espesor aproximado de 2 metros, de esa profundidad hasta los 38 metros, se localiza un estrato potente de limo orgánico de alta compresibilidad, consistencia blanda a media, plasticidad alta y olor fétido, intercaladas entre este gran estrato; bolsas de arena limosa y turba. A partir de esta profundidad y hasta los 45 metros aproximadamente, se localiza una arena limosa de compacidad densa a muy densa. En esta zona los asentamientos por consolidación son graves.

## METODOLOGÍA

Para la documentación de daños ocasionados a las viviendas por el sismo, se procedió a realizar en horas posteriores al evento, un censo, en donde se identificaron las viviendas que sufrieron daños tanto geotécnicos como estructurales, mediante su geolocalización, descripción de daños y reporte fotográfico, como se reporta en la tabla 1 y figuras 4 a la 8.

Del censo realizado, se pudieron contabilizar 21 viviendas que resultaron seriamente dañadas, concentradas en tres zonas potencialmente licuables (figura 2); en donde la mayoría de ellas presentaban un patrón común; durante el evento sísmico sufrieron asentamientos súbitos de gran magnitud en la cual emanó agua y arena del subsuelo (licuación de suelos). Este fenómeno se produce en medios granulares saturados y está asociado a un incremento en la presión de poros como resultado de la tendencia de las partículas a reacomodarse debido a las cargas cíclicas, lo que da como resultado una reducción en la resistencia al esfuerzo cortante, llegando a ser total, como fue en algunos de los casos que se reportan en este documento.

Tabla 1. Censo de viviendas dañadas por el sismo del 7/09/2017 ( $M_w$  8.2)

Id Vivienda Dañada	Coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM)		SPT más cercano	PVA más cercano	Dirección	Descripción de daños en vivienda
	X	Y				
VD01	342542.75	2005148.97	SPT-01	P24	Calle Aurelio López esquina con Mickey Mantle, Colonia Peloteros, Coatzacoalcos, Ver.	Asentamiento diferencial aproximado de 0.4 m, hacia la parte norte de la misma, ocasionando daños en la protección de la puerta principal.
VD02	342500.39	2005233.31	SPT-01	P24	Calle Aurelio López No. 409, Colonia Peloteros, Coatzacoalcos, Ver.	Asentamiento diferencial aproximado de 0.5 m, hacia la parte sur de la misma, ocasionando agrietamiento del piso, donde emanó agua y arena durante el sismo.
VD03	342416.89	2005232.97	SPT-01	P24	Calle Benjamín Cananea No. 405, Colonia Peloteros, Coatzacoalcos, Ver.	Deslizamiento y asentamiento diferencial hacia la parte sur de la misma, la cual provocó grietas considerables en las paredes.
VD04	342450.00	2005223.00	SPT-01	P24	Calle Benjamín Cananea No. 408, Colonia Peloteros, Coatzacoalcos, Ver.	Asentamiento diferencial aproximado de 0.5 m, hacia la parte sur de la misma, lo que ocasionó grietas en las paredes de la vivienda.

Tabla 1. Censo de viviendas dañadas por el sismo del 7/09/2017 ( $M_w$  8.2) (continuación)

Id Vivienda Dañada	Coordenadas		SPT más cercano	PVA más cercano	Dirección	Descripción de daños en vivienda
	X	Y				
VD05	342428.43	2005216.82	SPT-01	P24	Calle Benjamín Cananea No. 409, Colonia Peloteros, Coatzacoalcos, Ver.	Asentamiento diferencial aproximado de 0.8 m, hacia la parte de enfrente de la misma (lado este). Durante el sismo, emanó agua y arena del subsuelo.
VD06	342430.88	2005205.02	SPT-01	P24	Calle Benjamín Cananea No. 411, Colonia Peloteros, Coatzacoalcos, Ver.	Asentamiento diferencial aproximado de 0.7 m, hacia la parte trasera de la misma (lado oeste), ocasionando grietas en el piso y paredes. Durante el sismo emanó agua y arena del subsuelo.
VD07	342458.00	2005212.00	SPT-01	P24	Calle Benjamín Cananea No. 410, Colonia Peloteros, Coatzacoalcos, Ver.	Asentamiento diferencial aproximado de 0.5 m, ocasionando grietas en paredes y piso. Durante el sismo emanó agua y arena del subsuelo.
VD08	342470.95	2005202.06	SPT-01	P24	Calle Benjamín Cananea No. 412, Colonia Peloteros, Coatzacoalcos, Ver.	Asentamiento aproximado de 0.6 m, ocasionando ligeras grietas en paredes de la vivienda.
VD09	342400.26	2005112.16	SPT-01	P23	Calle 19 de Octubre, Colonia San Silverio, Coatzacoalcos, Ver.	Asentamiento diferencial aproximado de 0.5 m, hacia la parte trasera de la misma (lado este), ocasionando graves grietas en piso y paredes. Durante el sismo emanó agua y arena del subsuelo.
VD10	342375.73	2005199.40	SPT-01	P23	Calle 19 de Octubre, Colonia San Silverio, Coatzacoalcos, Ver.	Asentamiento diferencial ligero hacia al lado derecho (lado norte), agrietamientos en la losa de piso que atravesó toda la vivienda y grietas en los muros. Durante el sismo emanó agua y arena por las grietas del piso.
VD11	342361.99	2005249.71	SPT-01	P23	Calle 19 de Octubre, Colonia San Silverio, Coatzacoalcos, Ver.	Asentamiento aproximado de 0.5 m, ocasionando agrietamientos graves en pisos y muros de la vivienda. La barda se ladeó hacia la calle. Durante el sismo emanó agua y arena del subsuelo.
VD12	342354.87	2005298.68	SPT-01	P23	Calle 19 de Octubre No. 300, Colonia San Silverio, Coatzacoalcos, Ver.	El patio de enfrente de la casa sufrió un deslizamiento del suelo lo que provocó que parte de la cimentación de la vivienda quedara expuesta. Un pequeño cuarto al exterior se asentó de 1.2 a 1.5 m. La barda sufrió agrietamientos y ladeo importante. Durante el sismo emanó agua y arena del subsuelo.
VD13	342067.88	2005385.55	SPT-05	P25	Calle 10 de Noviembre, Colonia San Silverio, Coatzacoalcos, Ver.	La estructura se hundió homogéneamente, presentó un asentamiento total aproximado de 1.2 m. Durante el sismo emanó agua y arena del subsuelo.
VD14	341993.73	2005271.50	SPT-02	P25	Calle Soto la Marina, Colonia Divina Providencia, Coatzacoalcos, Ver.	Asentamiento diferencial aproximado de 0.5 m, ocasionando agrietamientos severos en muros y piso. Durante el sismo emanó agua y arena del subsuelo.
VD15	341986.00	2005269.00	SPT-02	P25	Calle Soto la Marina, Colonia Divina Providencia, Coatzacoalcos, Ver.	Asentamiento diferencial aproximado de 0.5 m, ocasionando agrietamientos severos en muros y piso. Durante el sismo emanó agua y arena del subsuelo.
VD16	344329.49	2004561.27	SPT-03	P21	Calle Miguel Hidalgo, Colonia Independencia, Coatzacoalcos, Ver.	Asentamiento diferencial del lado norte de la misma, ocasionando daño estructural severo. Durante el sismo emanó agua y arena del subsuelo.
VD17	344327.60	2004571.68	SPT-03	P21	Calle Miguel Hidalgo, Colonia Independencia, Coatzacoalcos, Ver.	La estructura no sufrió daño, debido a que está construida con láminas de zinc, solo se agrieto la losa de piso del cual emanó agua y arena.
VD18	344243.00	2004748.00	SPT-04	P21	Calle 20 de Noviembre, Colonia Independencia, Coatzacoalcos, Ver.	Asentamiento diferencial aproximado de 0.5 m, ocasionando agrietamiento de losa de piso donde emanó agua y arena.
VD19	344210.00	2004749.00	SPT-04	P21	Calle 20 de Noviembre, Colonia Independencia, Coatzacoalcos, Ver.	Asentamiento diferencial aproximado de 0.5 m.

Tabla 1. Censo de viviendas dañadas por el sismo del 7/09/2017 ( $M_w$  8.2) (continuación)

Id Vivienda Dañada	Coordenadas		SPT más cercano	PVA más cercano	Dirección	Descripción de daños en vivienda
	Universal Transversal de Mercator (UTM)	X				
VD20	349091.00	2005575.00	-----	P15	Calle Simón Bolívar, Colonia Frutos de la Revolución, Coatzacoalcos, Ver.	El terreno consta de dos viviendas, siendo la que se encuentra en la parte posterior presentó asentamiento diferencial aproximado de 0.3 m hacia la parte trasera de la misma.
VD21	349004.00	2005584.00	-----	P15	Calle Francisco Sarabia, Colonia Frutos de la Revolución, Coatzacoalcos, Ver.	Asentamiento diferencial aproximado de 0.4 m, ocasionando grietas en los muros.

VD Vivienda dañada  
SPT Sondeo de penetración estándar  
PVA Punto de vibración ambiental

A continuación, se presenta el reporte fotográfico (casos representativos) de viviendas que sufrieron daños:

- 1) VD01: Vivienda de un solo nivel ubicada en la calle Aurelio López esquina con Mickey Mantle, Colonia Peloteros, Coatzacoalcos, Ver. La vivienda presentó un asentamiento diferencial súbito aproximado de 0.4 m, hacia la parte norte de la misma.



a) Asentamiento en esquina

b) Inclinación lado norte

Figura 4. Vivienda dañada VD01

- 2) VD05: Vivienda de un solo nivel ubicada en la calle Benjamín Cananea No. 409, Colonia Peloteros, Coatzacoalcos, Ver. La vivienda presentó un asentamiento diferencial súbito aproximado de 0.8 m, en la parte del estacionamiento.



a) Antes del sismo

b) Despues del sismo

Figura 5. Vivienda dañada VD05

- 3) VD11: Vivienda de un solo nivel ubicada en la calle 19 de Octubre, Colonia San Silverio, Coatzacoalcos, Ver. La vivienda presentó un asentamiento diferencial súbito aproximado de 0.5 m.



a) Antes del sismo

b) Después del sismo

Figura 6. Vivienda dañada VD11

- 4) VD12: Vivienda de dos niveles ubicada en la calle 19 de Octubre No. 300, Colonia San Silverio, Coatzacoalcos, Ver. El frente de la vivienda sufrió un deslizamiento del suelo lo que provocó que parte de la cimentación quedara expuesta. Un pequeño cuarto al exterior se asentó de 1.2 a 1.5 m.



a) Barda inclinada

b) Deslizamiento del suelo

Figura 7. Vivienda dañada VD12

- 5) VD13: Vivienda de un solo nivel ubicada en la calle 10 de Noviembre, Colonia San Silverio, Coatzacoalcos, Ver. Fue la vivienda que más daños presentó, con un asentamiento súbito aproximado de 1.2 m.



a) Antes del sismo

b) Después del sismo

Figura 8. Vivienda dañada VD13

Para validar que los daños que se presentaron en las viviendas fueron debido al fenómeno descrito, fue necesario determinar la vulnerabilidad a la licuación de los estratos arenosos que subyacen en las zonas mencionadas, mediante el criterio del National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER) publicado por Youd et al. (2001), el cual compara la relación de resistencia cíclica (CRR) y la relación de esfuerzo cílico (CSR). La primera correlaciona la resistencia a la licuación con las características del suelo expresadas a través del número de golpes de la prueba de penetración estándar ( $N_{spt}$ ). Y la segunda está asociada a la aceleración máxima ( $a_{máx.}$ ) que se presenta en el depósito de suelo durante el evento sísmico.

### a) Sondeos geotécnicos.

Para contar con los perfiles estratigráficos de las zonas potencialmente licuables, se optó por ejecutar 5 sondeos de penetración estándar (SPT), ubicados como se muestra en la figura 3a y 3b y con las características que se mencionan en la tabla 2. Los perfiles estratigráficos obtenidos de los sondeos se presentan en las figuras 16 al 20.

Tabla 2. Características de los sondeos de penetración estándar (SPT) e influencia de estos sobre las VD y PVA

Sondeo	Coordinadas (UTM)		Prof. de Exploración (m)	Influencia del sondeo sobre las VD	Influencia del sondeo sobre los PVA	Zona potencialmente licuable No.
	X	Y				
SPT-01	342434.89	2005227.15	7.20	VD01 a la VD12	P23, P24	1
SPT-02	341972.00	2005257.00	9.60	VD14 y VD15	P25	1
SPT-03	344334.00	2004638.00	9.70	VD16 y VD17	P21	2
SPT-04	344200.00	2004741.00	9.70	VD18 y VD19	P21	2
SPT-05	342086.00	2005398.00	10.30	VD13	P25	1

UTM Universal Transversal de Mercator  
VD Viviendas dañadas  
PVA Puntos de vibración ambiental



a) SPT-02

b) SPT-03

c) SPT-05

Figura 9. Ejecución de los sondeos de penetración estándar

### b) Estimación de la aceleración máxima en superficie.

Las aceleraciones máximas en roca ( $a_0^r$ ) estimadas con el programa PRODISIS (CFE-2015), tienen una diferencia mínima del 8% entre las ciudades de Minatitlán (mayores) y Coatzacoalcos (figura 1); por ello se creyó apropiado emplear el acelerograma registrado en la estación MIHL (figura 10) de Minatitlán, Ver., ubicada a 17 km de la zona en estudio y operada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM<sup>1</sup>. A este registro se le quitó el efecto de sitio para obtener el acelerograma en roca (AR), y posteriormente calcular los acelerogramas en superficie (ASC) en la zona de estudio, en la ciudad de Coatzacoalcos.

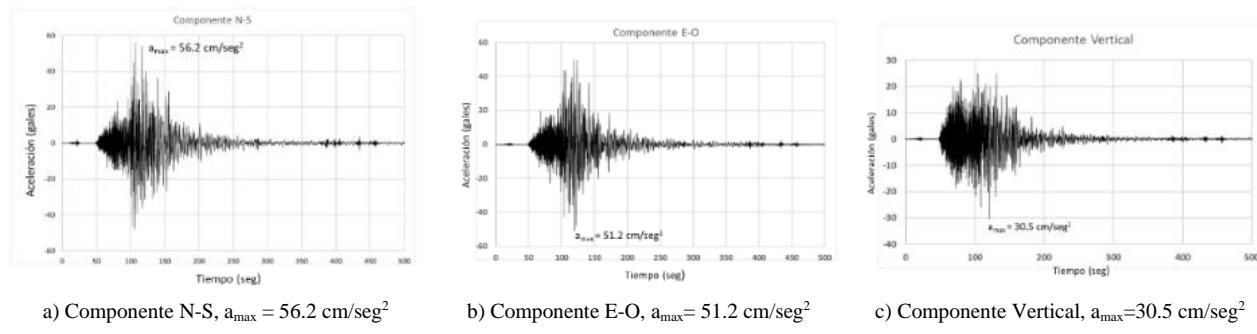


Figura 10. Registro del sismo de Tehuantepec ( $M_w$  8.2) del 7 de septiembre de 2017 en estación MIHL<sup>1</sup>

Es frecuente evaluar el efecto de sitio (Lermo et al., 1993; Chávez et al., 2014), utilizando el cociente espectral de la componente horizontal con la vertical en el dominio de las frecuencias, para registros de sismos obtenidos en una estación sobre sedimentos, EHVSR, (Earthquake Horizontal to Vertical Spectral Ratio), cuando no se cuenta con una estación de referencia cercana, o que haya registrado los mismos eventos. El cociente espectral para el registro del sismo del 7 de septiembre de 2017 en la estación MIHL se determinó para cada dirección (N-S y E-W), y después se promediaron. Para estos cálculos se utilizó el programa DEGTRA (Ordaz et al., 2013) y los resultados se muestran en la figura 11a.

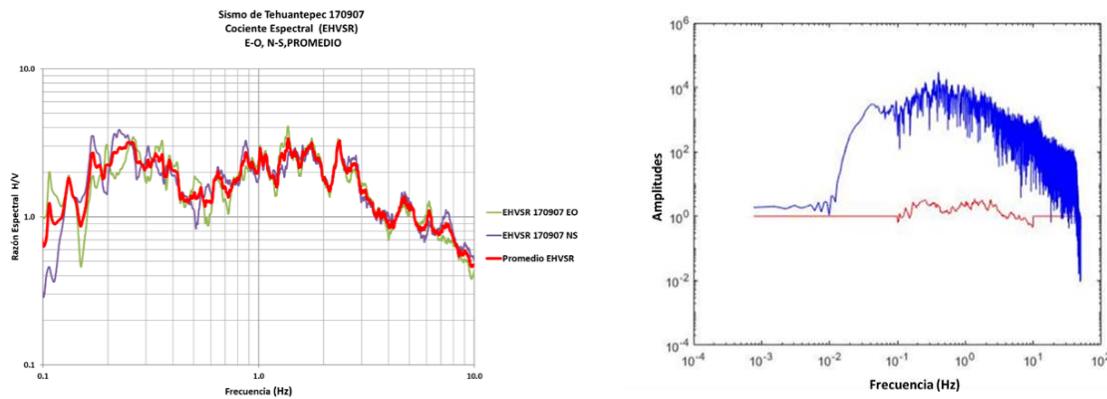
Para eliminar el efecto de sitio al registro del sismo en superficie y determinar el acelerograma en roca (AR), se realizó un escalamiento entre la función de transferencia (EHVSR) determinada con el registro sísmico, y la componente horizontal del sismo que presentaba la mayor aceleración o energía. Primero, al acelerograma en superficie se le aplicó la transformada rápida de Fourier para obtener su respectivo espectro de amplitudes de Fourier (EAFS); de este último, sólo se considera el vector de amplitudes, pero no el de la fase (figura 11b). Como la componente N-S del sismo presentó las mayores aceleraciones, se utilizó para determinar el acelerograma en roca (AR). Una vez que se tienen la EHVSR y el EAES, en el dominio de las frecuencias, se calculó una “seudo” deconvolución (sólo se emplea el vector de amplitudes), dividiendo su respectivo efecto de sitio. Como segundo paso, al cociente se le aplica la transformada inversa de Fourier para obtener la señal en el dominio del tiempo, es decir el acelerograma en roca (AR) (figura 12). El programa utilizado fue desarrollado en ambiente Matlab (J. Lermo Samaniego y D. Vega Rocha, comunicación personal, febrero 2011).

### c) Efecto de sitio en la zona de estudio

En la práctica, es común abordar los efectos de sitio en una de estas dos rutas: la primera consiste en estimar las frecuencias para obtener la amplificación y la amplitud de ésta, ya sea utilizando registros de

<sup>1</sup> Los datos sísmicos proporcionados a través del Sistema de Base de Datos Acelerográficos en web (<http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/>) han sido producto de las labores de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, así como de la infraestructura de TI el propio instituto.

sismos o de vibración ambiental. La segunda, aborda el problema determinando la geometría y las propiedades mecánicas de los materiales del subsuelo (Chávez-García et al, 2014).



a) Estación MIHL. Cociente espectral EHVSR      b) Espectro de amplitudes de Fourier del registro en superficie (azul) y EHVSR (rojo)

Figura 11. Determinación del acelerograma en roca (AR)

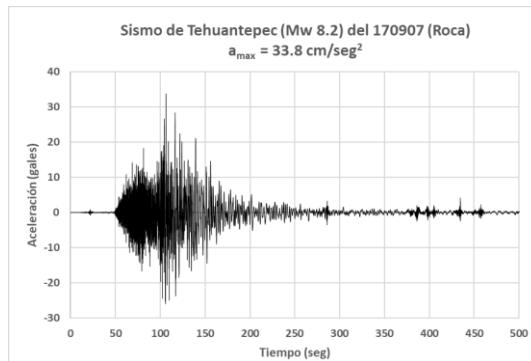


Figura 12. Acelerograma en roca (AR),  $a_{\max} = 33.8 \text{ cm/seg}^2$

Lermo y Chávez-García (1993) obtuvieron con ruido (vibración ambiental o microtremores), una buena estimación de la frecuencia de resonancia del suelo, usando la relación espectral entre los movimientos horizontales y verticales (H/V) de un mismo registro de ruido en un mismo sitio. Esto se ha estudiado ampliamente señalando sus ventajas y limitaciones, entre estas últimas se ha observado que la amplificación solo es una idea aproximada de la real. A la relación H/V se le han dado diversas explicaciones: una es suponer que los microtremores se componen principalmente de ondas superficiales, relacionándolas con las ondas Rayleigh, mientras que otros autores postulan que las ondas de cuerpo dan el pico máximo de la relación H/V.

Estudios recientes realizados por Sánchez-Sesma et al., (2011b), proponen una teoría que sugiere que el cociente H/V (Técnica de Nakamura o MHVSR, Microtremor Horizontal to Vertical Spectral Ratio) es un estimador adecuado del nivel de amplificación del sitio, tal cociente, describe adecuadamente las principales propiedades dinámicas de suelo que interesan evaluar para determinar la respuesta del sitio (Efecto de sitio), y asume que el ruido es una onda de campo difuso que contiene todo tipo de ondas elásticas que dan una idea física de profundidad. Por ello, los cocientes espectrales H/V han mostrado ser útiles tanto para analizar registros de sismos como registros de vibración ambiental (Field y Jacob, 1995). A partir de la publicación de Lermo y Chávez-García (1994a), la técnica se popularizó y se han publicado una gran cantidad de artículos sobre el tema, lo que explica el éxito de una de las técnicas más utilizadas hoy en día.

Para este estudio se tomaron 13 registros de vibración ambiental en la zona de interés, distribuidos tomando en cuenta la ubicación de los daños en las viviendas. El criterio general de distribución fue, el de colocar una mayor densidad de puntos en los sitios que correspondan a zonas de depósitos sedimentarios con características de terrenos geotécnicamente blando (ZGB), infiriendo que en esta zona en particular se presentará una amplificación de ondas sísmicas, y así evaluar el efecto de sitio de los puntos P23, P24 y P25 (figura 3a).

Los equipos de registro que se utilizaron para la campaña de vibración ambiental fueron dos sismómetros triaxiales digitales de banda ancha de la marca Guralp Systems CMG-6TD (6D37 y TD6618), los cuales cuentan con tres canales de registro de velocidades ortogonales, así como accesorios periféricos como GPS, batería externa de respaldo, cables y otros. Fueron orientados conforme al norte magnético y la duración de los registros fueron de una hora en cada sitio, con un muestreo de 100 muestras por segundo. Los registros de vibración ambiental fueron corregidos por línea base y filtrados con un filtro pasa bandas de 0.1 a 10 Hz y un método de filtrado de Butterworth de cuarto orden. Una vez acondicionada la señal se realizó el cociente espectral entre la raíz cuadrada del promedio de los espectros de amplitudes de Fourier de las señales horizontales y el espectro de amplitudes de Fourier de la señal vertical, al resultado se le aplicó un suavizado de Konno & Omachi con un factor de suavizado de 40; todos estos procesos se hicieron con el programa GEOPSY para así obtener los cocientes espectrales H/V que se muestran en la figura 13a.

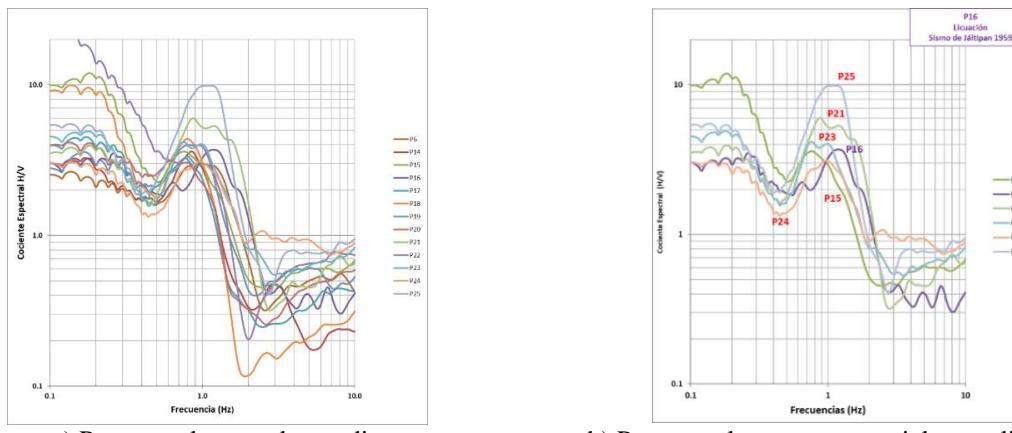


Figura. 13. Cocientes espectrales H/V

En la zona en estudio se identificaron tres zonas potencialmente licuables y en la tabla 3 se relacionan las zonas con los puntos donde se tomaron registros de vibración ambiental. En la figura 13b, se indican los cocientes espectrales de los puntos incluidos en las zonas y el punto P16 donde hubo licuación en el sismo de Jáltipan de 1959.

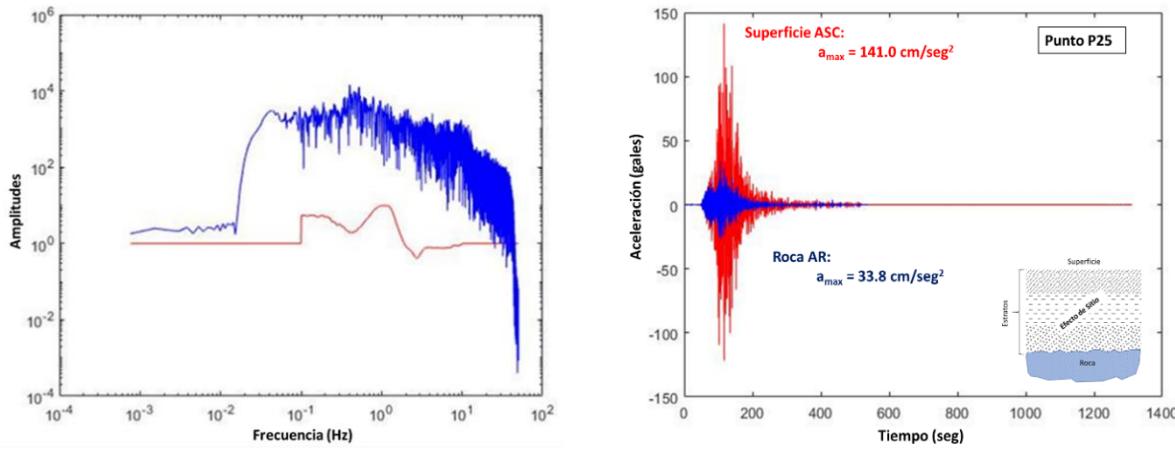
Tabla 3. Vibración ambiental vs zonas potencialmente licuables

Puntos	Frecuencia (Hz)			Periodo (seg)			Amplificación			Zona
P23, P24, P25	0.97	1.02	1.07	1.03	0.98	0.94	4.03	3.04	9.87	1
P21		0.94			1.06			5.63		2
P15		0.77			1.30			3.6		3

Se estimó el efecto de sitio en los lugares donde se tomaron registros de vibración ambiental, y con ellos se determinaron los acelerogramas en superficie. Para lo anterior, se realizó una “seudo” convolución

entre el espectro de amplitudes de Fourier (EAFR) del AR, con los cocientes espetrales (H/V) de las señales de ruido sísmico registradas (HVNR), para ello se realizó el producto del EAFR con H/V y así considerar las amplificaciones por el efecto de sitio en la señal. Finalmente se aplicó una transformada inversa de Fourier para obtener la señal en el dominio del tiempo, es decir el acelerograma en superficie ASC (acelerogramas sintéticos).

En la figura 14a se muestra el espectro de amplitudes del AR, línea azul, y los cocientes espetrales H/V del punto 25, línea roja, por ser el sitio en donde se presentan las mayores amplificaciones. Los acelerogramas del sitio se muestran en la figura 14b, en donde en azul aparece el AR y en rojo el acelerograma en superficie ASC, apreciándose de esta manera la amplificación que sufre la señal al propagarse hasta llegar a la superficie.



a) Espectro de amplitudes de Fourier del registro en roca (azul) y HVNR (rojo)

b) Acelerograma en roca (azul) y acelerograma en superficie (rojo)

Figura 14. Efecto de sitio en el punto P25

Este mismo procedimiento se siguió para los demás puntos, y en la tabla 4 su muestran las aceleraciones en superficie en los puntos incluidos en las zonas potencialmente licuables. También se muestran las aceleraciones en el punto P16, que corresponden a un punto cercano a la zona donde se presentó licuación de arenas durante el sismo de Jáltipan de 1959. El valor obtenido en este punto P16, corresponde a 0.064 de la gravedad (62.5 gales), valor muy cercano al mínimo dentro del rango (0.07 a 0.2 de la gravedad) que reportan Cossio, 1960; Marsal, 1961 para el sismo de Jáltipan.

Para tener una referencia del nivel de aceleraciones que se presentaron en la zona de estudio durante el sismo del 7 de septiembre de 2017, se hizo una comparación entre las aceleraciones en superficie que se alcanzaron durante este sismo, y las aceleraciones de diseño que se pueden presentar cuando se emplean las máximas aceleraciones probables, considerando el peligro sísmico de acuerdo con el PRODISIS, tabla 4. Para ello se obtuvieron del PRODISIS tres acelerogramas sintéticos cuyos espectros de respuesta se ajustan al espectro de peligro uniforme (espectro de referencia, ER) para la zona de estudio, figura 15. Como los acelerogramas sintéticos de la figura 15b, representan al movimiento del suelo basal, es decir en roca, fue necesario realizar la “seudo” convolución (siguiendo el procedimiento descrito anteriormente) entre el espectro de amplitudes de Fourier de los acelerogramas sintéticos y el producto espectral HVNR, que se obtuvo de ruido sísmico, en los puntos de estudio.

De la tabla 4 podemos observar que, a pesar de que las aceleraciones en superficie del sismo fueron inferiores a las de diseño de acuerdo con PRODISIS, éstas provocaron que el suelo presentara fallas por

licuación. Esto es una señal clara de la disposición que tiene el suelo de esta zona para presentar este tipo de falla, y el hecho de que las aceleraciones de diseño no se alcanzaran nos indican que, de hacerlo, la zona de daño por esta causa pudo haber sido mucho mayor.

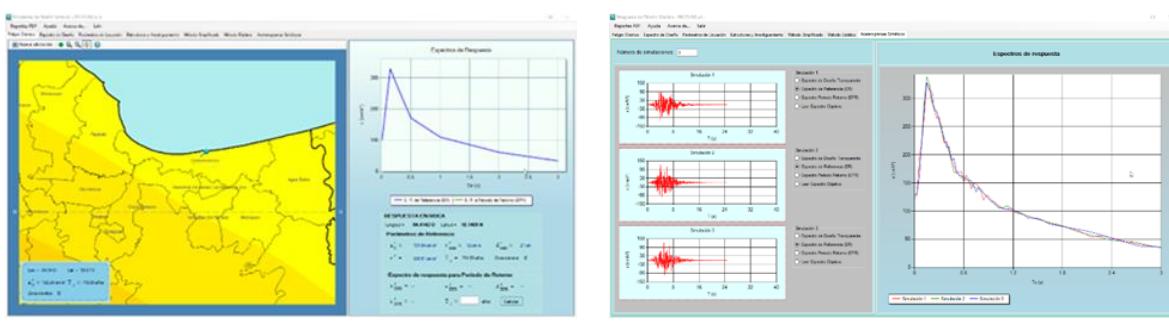


Tabla 4 Aceleraciones en superficie (gales) por zonas

Zona	Sismo de Tehuantepec 7 septiembre 2017 (M <sub>w</sub> 8.2)			Para diseño de acuerdo a PRODISIS <sup>1</sup>				Punto P16 <sup>3</sup>				
				S1	S2	S3	Promedio	f (hz)	T (seg)	A		
1	P23	P24	P25	241.5	280.8	253.6	258.6 <sup>2</sup>	1.3	0.33	3.6		
	67.6	55.4	141.0									
2	97.1			182.1	214.6	184.2	193.6	62.5				
3	79.4			123.7	115.1	146.7	128.5					

<sup>1</sup> Considerando 3 acelerogramas sintéticos

<sup>2</sup> Se evalúo en el punto P25

<sup>3</sup>Zona donde se presentó licuación en el sismo de Jáltipan 1959

## VULNERABILIDAD A LA LICUACIÓN

El método del National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER) publicado por Youd et al. (2001), evalúa la vulnerabilidad a la licuación de estratos arenosos, por medio de un factor de seguridad contra la licuación y la define como:

$$FS_{lic} = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \quad (1)$$

En donde CRR representa la capacidad de resistencia del suelo a licuarse y CSR representa la fuerza sísmica que actúa en el suelo. En teoría, cuando el valor del factor de seguridad ( $FS_{lic}$ ) es menor que la unidad, se presenta el fenómeno a la profundidad analizada. En la práctica existe incertidumbre acerca del valor del  $FS_{lic}$  que debe utilizarse, ya que han existido casos en los cuales el suelo se ha licuado a pesar de tener un  $FS_{lic} > 1$  (Youd e Idriss, 2001). Por lo anterior, el Building Seismic Safety Council (BSSC, 2003) recomienda que el  $FS_{lic}$  debe de estar sujeto a la importancia de la estructura y potencial de deformación del suelo. Martin y Lew (1999) sugirieron valores del  $FS_{lic}$  asociados al número de golpes de la prueba SPT, en donde para valores de  $N_{spt} < 15$ , recomienda utilizar un  $FS_{lic}$  de 1.2. Esta última consideración fue adoptada para nuestro análisis.

### **Relación de esfuerzos cíclicos (CSR).**

Seed e Idriss (1971) propusieron una expresión para la determinación de la relación de esfuerzos cíclicos (CSR). Esta expresión, con algunos cambios (Youd et al, 2001), se aplica actualmente en la práctica profesional para establecer el esfuerzo máximo inducido por el sismo en un depósito de suelo.

$$CSR = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d / MSF * K_\sigma * K_\alpha \quad (2)$$

donde:  $a_{max}$  es la aceleración máxima del suelo que se presentó durante el evento sísmico, medida en la superficie del terreno y obtenida mediante una campaña de vibración ambiental (tabla 4);  $g$  es la aceleración de la gravedad;  $\sigma_v, \sigma'_v$  es el esfuerzo vertical total y efectivo respectivo;  $r_d$  es el coeficiente de reducción de esfuerzos;  $MSF$  factor de escala de la magnitud del sismo;  $K_\sigma$  factor de esfuerzo de confinamiento y  $K_\alpha$  factor de esfuerzos cortantes estáticos.

Para el cálculo de  $r_d$  se emplearon las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} r_d &= 1.0 - 0.00765z && \text{para } z < 9.15m \\ r_d &= 1.174 - 0.0267z && \text{para } 9.15m \leq z \leq 23m \\ r_d &= 0.744 - 0.008z && \text{para } 23m < z \leq 30m \end{aligned} \quad (3)$$

Para el cálculo del factor de escala de la magnitud del sismo ( $MSF$ ) se utilizó la fórmula desarrollada por Seed e Idriss (1982) y publicada por Youd et al (2001).

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad (4)$$

donde:  $M_w$  representa la magnitud del sismo, la cual para este análisis se consideró igual a 8.2. Para la determinación del factor de corrección por esfuerzos de confinamiento ( $K_\sigma$ ) se utilizó la siguiente ecuación:

$$K_\sigma = (\sigma'_v / P_a)^{(f-1)} \quad (5)$$

donde:  $\sigma'_v$  es el esfuerzo vertical efectivo;  $P_a$ , es la presión atmosférica y  $f$ , es un exponente que está en función de las condiciones del sitio, que considera la compacidad relativa, la historia de esfuerzos del suelo y la edad geológica. Respecto al valor de los esfuerzos cortantes estáticos ( $K_\alpha$ ), en la práctica profesional no se recomienda el uso de este factor debido a la falta de aun, una mayor investigación, para lo cual para fines de este trabajo se consideró igual a la unidad.

### **Relación de resistencia cíclica (CRR).**

Para la determinación de la relación de resistencia cíclica (CRR), se utilizó el método empírico simplificado propuesto por Seed e Idriss (1971) y modificado por Youd, et al, (2001), el cual consiste en evaluar la resistencia que presenta el suelo a la licuación mediante el número de golpes de la prueba de penetración estándar ( $N_{SPT}$ ), con la siguiente expresión:

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10 \cdot (N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (6)$$

donde  $(N_1)_{60}$ , es el número de golpes corregido y normalizado a una sobrecarga de 100 kPa. Esta ecuación sólo es válida para  $(N_1)_{60} < 30$  golpes, ya que para valores mayores de 30 golpes los suelos se clasifican como no licuables. Para realizar la corrección del número de golpes ( $N_{SPT}$ ), se utilizó la siguiente expresión:

$$(N_1)_{60} = N_{SPT} \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \quad (7)$$

donde  $C_N$ , es el factor de corrección por confinamiento;  $C_E$ , factor de corrección de energía del martillo ( $E_R$ );  $C_B$ , factor de corrección por diámetro de perforación;  $C_R$ , factor de corrección por longitud de la barra perforadora y  $C_S$ , es el factor de corrección del muestrador. Para tomar en cuenta la influencia del contenido de finos, Idriss con ayuda de Seed, desarrollaron las siguientes ecuaciones para corregir el valor de  $(N_1)_{60}$ :

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (8)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son coeficientes determinados de las siguientes relaciones:

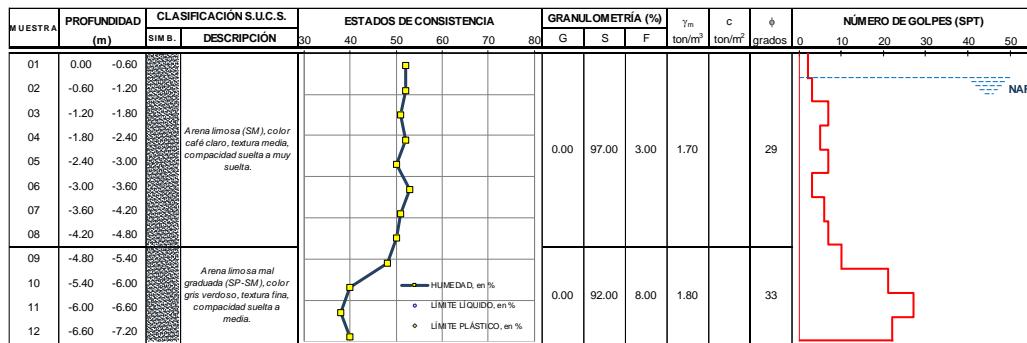
$$\begin{aligned} \alpha &= 0 \text{ para } CF \leq 5\% \\ \alpha &= \exp[1.76 - (190/CF^2)] \text{ para } 5\% < CF < 35\% \\ \alpha &= 5.0 \text{ para } CF \geq 35\% \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \beta &= 1.0 \text{ para } CF \leq 5\% \\ \beta &= [0.99 + (CF^{1.5}/1000)] \text{ para } 5\% < CF < 35\% \\ \beta &= 1.2 \text{ para } CF \geq 35\% \end{aligned} \quad (10)$$

## RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis de la vulnerabilidad a licuación de cada uno de los sondeos;

- 1) **Sondeo SPT-01:** Como se puede observar en la figura 16, durante el evento sísmico, se estimó que se licuó un espesor de arena de aproximadamente 1.3 m (profundidad -2.70 al -4.00). Esto se puede atribuir; a que en este nivel se tiene una arena limosa en condiciones saturadas, cuya compacidad transita de suelta a muy suelta y números de golpes  $N_{SPT} \leq 7$ . Estas condiciones geotécnicas desfavorables predominan en esa parte de la ciudad, lo que puede explicar las amplificaciones del evento sísmico y los subsecuentes asentamientos súbitos que se presentaron en las viviendas VD01 a la VD12.



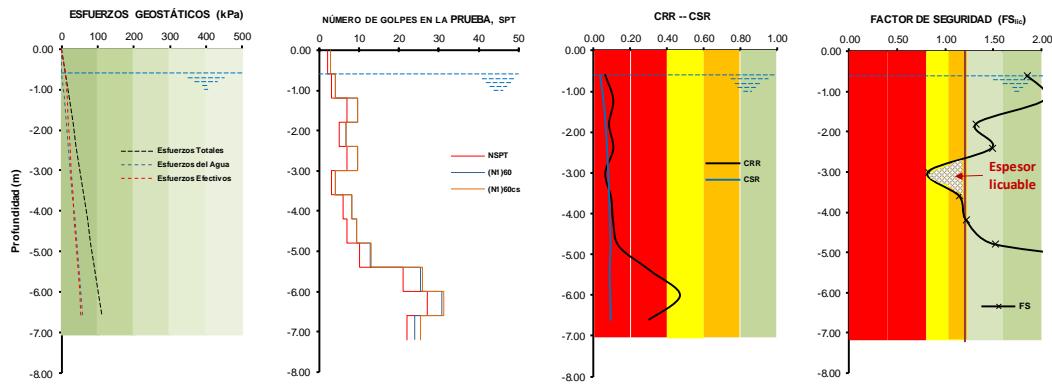


Figura 16. Perfil estratigráfico y resultados del análisis a la vulnerabilidad a la licuación del sondeo SPT-01

- 2) **Sondeo SPT-02:** Como se puede observar en la figura 17, durante el evento sísmico, se estimó que se licuaron dos estratos; el primero de un espesor aproximado de 1.8 m (profundidad -3.00 al -4.80), en donde se localiza una arena limosa saturada, cuya compacidad es suelta, con números de golpes  $N_{SPT} \leq 6$ , el segundo estrato que se licuó, corresponde a un espesor de 1.2 m (profundidad -6.60 al -7.80), en la cual se tiene igualmente una arena limosa saturada, con una compacidad muy suelta y números de golpes  $N_{SPT} \leq 4$ . En esta parte de la ciudad sufrieron asentamientos súbitos las viviendas VD14 y VD15.

MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	CLASIFICACIÓN S.U.C.S. SIM B DESCRIPCIÓN	ESTADOS DE CONSISTENCIA					$\gamma_m$ ton/m <sup>3</sup>	c ton/m <sup>2</sup>	$\phi$ grados	NÚMERO DE GOLPES (SPT)
			0	20	40	60	80				
01	0.00	-0.60									
02	-0.60	-1.20									
03	-1.20	-1.80	Arena limosa mal graduada (SP-SM), color gris oscuro, textura fina, compacidad suelta a media.								
04	-1.80	-2.40									
05	-2.40	-3.00									
06	-3.00	-3.60									
07	-3.60	-4.20									
08	-4.20	-4.80									
09	-4.80	-5.40									
10	-5.40	-6.00									
11	-6.00	-6.60									
12	-6.60	-7.20									
13	-7.20	-7.80									
14	-7.80	-8.40									
15	-8.40	-9.00									
16	-9.00	-9.60									

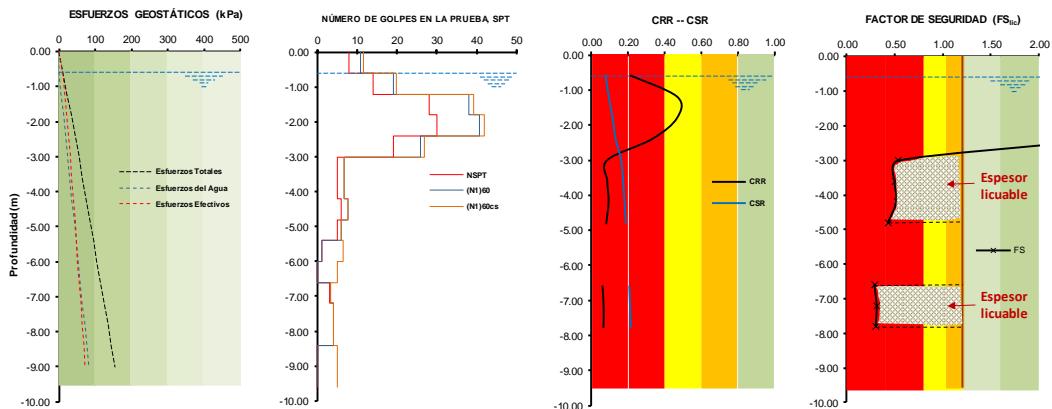


Figura 17. Perfil estratigráfico y resultados del análisis a la vulnerabilidad a la licuación del sondeo SPT-02

3) **Sondeo SPT-03:** Como se puede observar en la figura 18, durante el evento sísmico, se estimó que se licuaron parcialmente dos estratos; en el primer estrato, que es una arena limosa mal graduada, la cual transita de una compacidad densa a suelta, se licuaron 0.4 m en su parte inferior (profundidad -2.60 al -3.00) y el segundo estrato que se licuó, corresponde a una arena limosa, cuya compacidad transita de media a muy suelta, con número de golpes  $N_{SPT} \leq 15$ , el colapso se presentó en su parte superior (profundidad -6.10 al -7.30) como inferior (profundidad -7.90 al -9.30). En esta parte de la ciudad sufrieron asentamientos súbitos las viviendas VD16 y VD17.

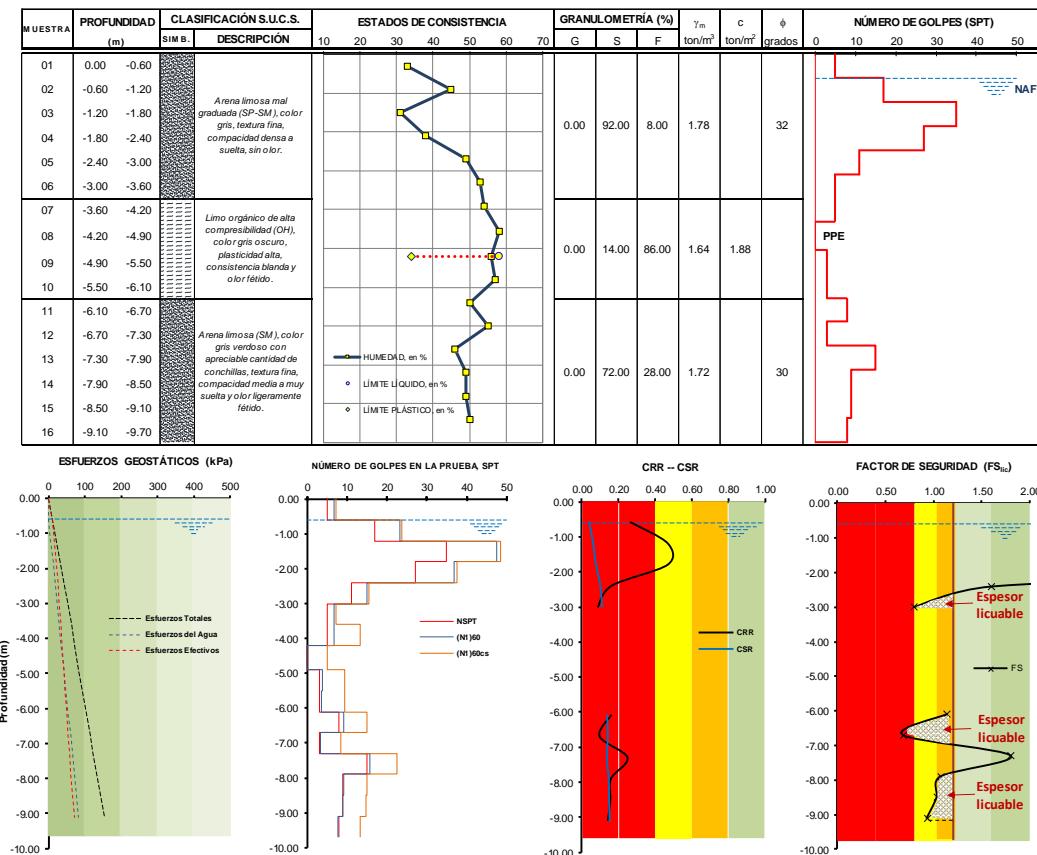


Figura 18. Perfil estratigráfico y resultados del análisis a la vulnerabilidad a la licuación del sondeo SPT-03

4) **Sondeo SPT-04:** Como se puede observar en la figura 19, durante el evento sísmico se estimó que se licuaron dos estratos; en el primero estrato, se tiene una arena limosa mal graduada, con una compacidad muy suelta y número de golpes  $N_{SPT} \leq 4$ , se licuó aproximadamente 2.7 m (profundidad -0.60 al -3.00). El segundo estrato que se licuó corresponde a una arena limosa, la cual transita de una compacidad muy suelta a media. En este estrato, el fenómeno se presentó tanto en la parte superior (profundidad -6.10 al -7.90) como inferior (profundidad -8.20 al -9.20). En esta parte de la ciudad sufrieron asentamientos súbitos las viviendas VD18 y VD19.

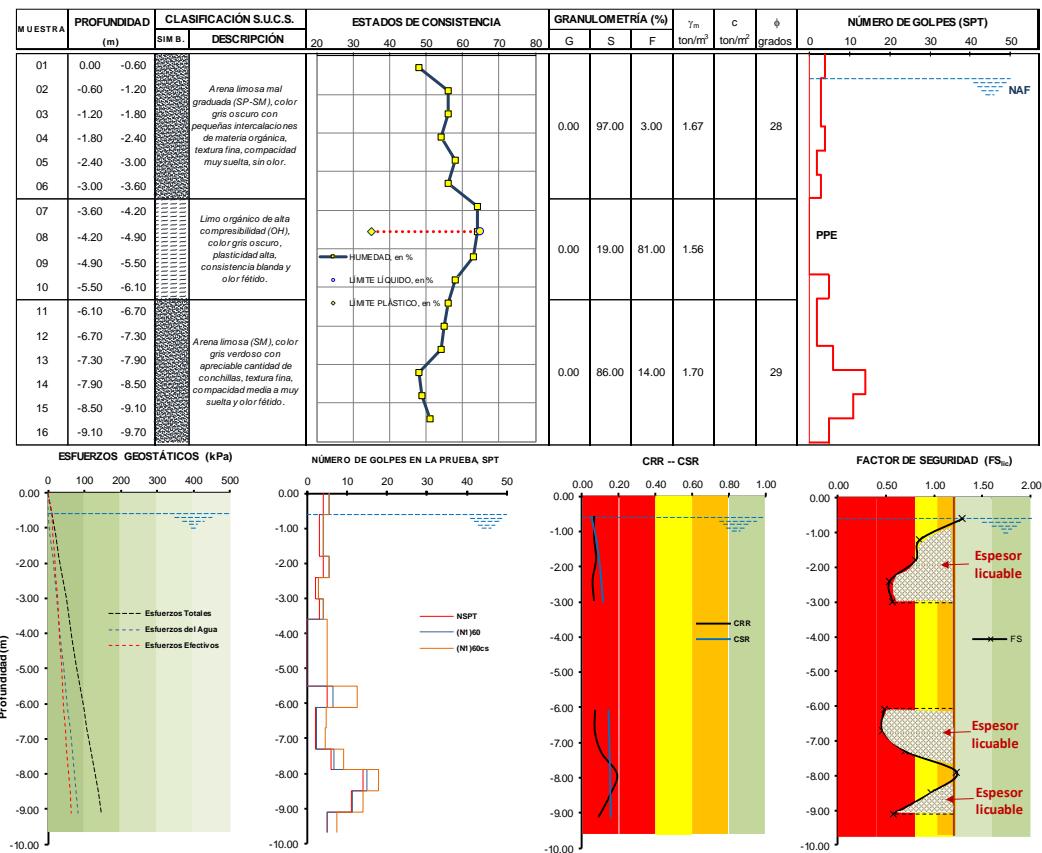


Figura 19. Perfil estratigráfico y resultados del análisis a la vulnerabilidad a la licuación del sondeo SPT-04

- 5) **Sondeo SPT-05:** Como se puede observar en la figura 20, durante el evento sísmico se estimó que se licuaron tres estratos; el primero de un espesor aproximado de 2.3 m (profundidad -1.30 al -3.60), en donde se localizó una arena limosa saturada transitando de una compacidad media a muy suelta en su parte inferior, el segundo estrato que se licuó, tiene un espesor de 1.3 m (profundidad -4.80 al -6.10), en el cual se localizó una arena limosa mal graduada saturada, con una compacidad suelta a muy suelta y por último, en el tercer estrato solo se licuó un espesor pequeño de 0.7 m (profundidad -9.00 al -9.70) en la cual igualmente se tiene una arena limosa, con una compacidad muy suelta. En los tres estratos en donde se presentó la licuación se tienen números de golpes  $N_{SPT} \leq 7$ . En este punto se localizó la vivienda VD13, la cual fue la que más daños presentó durante el evento sísmico.

De los 5 sondeos realizados para este trabajo, este sondeo en particular, presenta las condiciones geotécnicas más desfavorables, esto se atribuye a que, esta zona corresponde a terrenos ganados al pantano, lo que puede explicar las amplificaciones del movimiento sísmico (efecto de sitio) y el subsecuente hundimiento de la vivienda ya mencionada, que llegó hacer de hasta 1.2 m, tal como se puede visualizar en la figura 8.

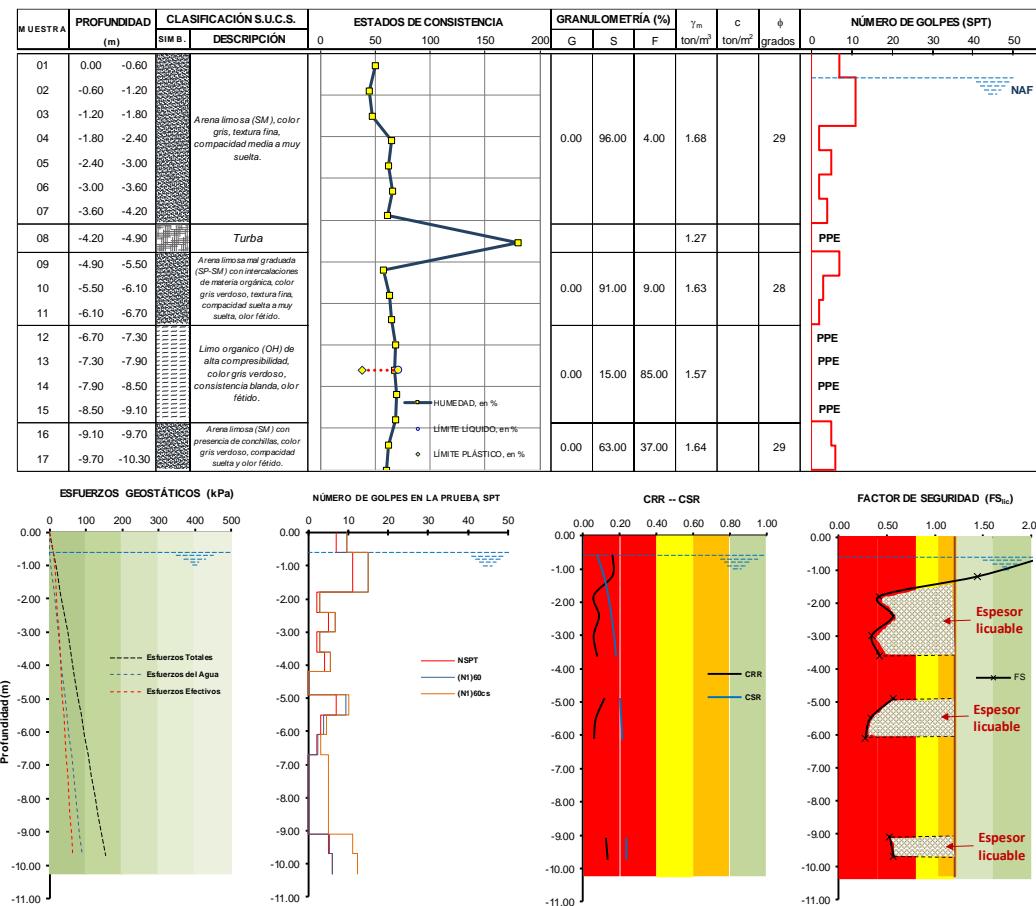


Figura 20. Perfil estratigráfico y resultados del análisis a la vulnerabilidad a la licuación del sondeo SPT-05

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un análisis de daños ocasionados en viviendas ubicadas en la ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz, México., por el sismo de magnitud 8.2 ( $M_w$ ) que se suscitó el 7 de septiembre de 2017, en las costas de Pijijiapan, Chiapas. Se revisaron los daños en 21 viviendas, localizadas principalmente en la zona sur de la ciudad (ZGT y ZGB), las cuales presentaron asentamientos súbitos atribuibles al fenómeno de licuación parcial de los estratos arenosos que subyacen en esta zona. Para lo anterior, se realizó un censo de daños en horas y días posteriores al evento sísmico, se ejecutaron 5 sondeos de penetración estándar (SPT) y se llevó a cabo una campaña de vibración ambiental. Del análisis de resultados se concluye lo siguiente:

- De la concentración de viviendas que presentaron fallas, se pudieron identificar tres zonas potencialmente licuables dentro de la zona urbana de la ciudad (figura 2), de las cuales, las viviendas desplantadas en la zona potencialmente licuable No. 1, fueron las que registraron los mayores daños tanto geotécnicos como estructurales; esto se atribuye a que, esta zona corresponde a terrenos ganados al pantano, en donde se tienen características geotécnicas muy desfavorables como se observa en los perfiles estratigráficos obtenidos de los sondeos SPT-01, SPT-02 y SPT-05 (figura 16, 17 y 20) que provocan una amplificación del movimiento sísmico (efecto de sitio).

2. Se puede observar en la figura 13 que la máxima amplitud ocurrió en el punto P25, siendo congruente con el perfil estratigráfico del sitio, identificado como sondeo SPT-05 (figura 20). En este punto de estudio, se localizó la vivienda que más daños presentó (VD13), con un asentamiento súbito aproximado de 1.2 m (figura 8).
3. Las técnicas EHVR y MHVR, para la determinación del efecto de sitio y generar acelerogramas sintéticos para tener una estimación de las aceleraciones en superficie, es una metodología sencilla que hace a esta área de la ingeniería sísmica más asequible. Una muestra de esta metodología se resume en la tabla 4, donde podemos observar que, a pesar de que las aceleraciones en superficie del sismo del 7 de septiembre de 2017 fueron inferiores a las de diseño, de acuerdo con PRODISIS, éstas provocaron que el suelo presentara fallas por licuación. Esto es una clara señal de la disposición que tienen los suelos de estas zonas para presentar este tipo de falla, y el hecho de que las aceleraciones de diseño no se alcanzaran nos indican que, de hacerlo, la zona de daño por esta causa pudo haber sido mucho mayor.
4. En los 5 sondeos de penetración estándar (SPT) que se ejecutaron, en todos, se localizaron estratos de arena limosa (SM) y arena limosa mal graduadas (SP-SM) en condiciones saturadas, cuya compacidad transita de manera errática de suelta a muy suelta entre estratos. El origen de estos, está asociado a dos procesos; 1) Origen geológico, proceso natural donde mayormente los vientos del norte trasladan los granos de arena que forman los médanos y dunas de la zona costera hacia la parte sur de la ciudad y 2) Origen artificial, debido a que el procedimiento más usado para construir en esta zona ha sido, el empleo de rellenos de arena de médano provenientes de la ZGC y en menor medida de la ZGA. La utilización, de este relleno, tiene tres funciones principales: 1) Elevar el nivel de desplante de las viviendas, debido a que, en esta zona, se tienen niveles topográficos iguales al nivel del mar e incluso en algunos puntos debajo del mismo, por lo que la presencia superficial del NAF es una constante, 2) Incrementar la capacidad de carga del suelo y 3) Mitigar los asentamientos por consolidación que se presentan en los estratos blandos que subyacen en esta zona. Desafortunadamente, la entidad no cuenta con una normativa local que regule los procedimientos constructivos a seguir en estos casos, por lo que el empleo de este relleno se realiza sin ningún control de calidad, provocando con ello tener suelos sueltos o medianamente compactos. Al transcurrir de los años, el nivel de este relleno tiende a bajar, debido a los grandes asentamientos por consolidación que se presentan en los estratos blandos inferiores, llegando este estrato, a los niveles originales del nivel del terreno natural, en donde se traslapa con el nivel de las aguas freáticas que, en este punto, se localiza superficialmente, transitando así, de tener un depósito de suelo en condiciones no saturadas a condiciones saturadas. Como resultado de todo este largo proceso, se tienen; suelos arenosos sueltos, saturados y susceptibles al fenómeno de licuación ante ciertas condiciones sísmicas, como el ocurrido el 7 de septiembre de 2017.
5. Los asentamientos súbitos, que se presentaron en las 21 viviendas analizadas en este trabajo, son atribuibles al fenómeno de la licuación de suelos que se presentó en los estratos arenosos sueltos ya mencionados.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana; Héctor Rafael Cruz González, Samantha Guadalupe Reynaga Vera, Alberto Valencia Chigui y Hernán Iván Martín del Campo Salazar por su invaluable apoyo en el censo a las viviendas dañadas, los sondeos de penetración estándar (SPT) y la campaña de vibración ambiental. Así mismo, agradecimiento especial al M.E.R. Roberto Rivera Baizabal del Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana por el apoyo técnico con los sismómetros Guralp durante las campañas de vibración ambiental.

## REFERENCIAS

- Arciniega-Ceballos, A., (1990), “Modelo semi-empírico para estimar espectros de respuesta sísmicos en el valle de México”, *Tesis de licenciatura*, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Astudillo, L, J A Guzmán, F Trejo, F Williams, G Riquer y R Leyva (2010), “Propuesta de zonificación geotécnica de la zona urbana de la Cd. de Coatzacoalcos, Ver.” *Memorias de la XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Acapulco, Guerrero, México, pp. 247-252.
- Chávez-García, F J y G A Montalva (2014), “Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway”. *Obras y Proyectos*, (16), 6-30. [DOI: 10.4067/S0718-28132014000200001](https://doi.org/10.4067/S0718-28132014000200001)
- Diario Oficial de la Federación (DOF) (2017), “DECLARATORIA de Desastre Natural por la ocurrencia de sismo con magnitud 8.2 de septiembre de 2017, en 6 municipios del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave”. [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5497977&fecha=20/09/2017](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5497977&fecha=20/09/2017)
- Díaz de Cossio, R (1960), “Foundation Failures during the Coatzacoalcos (México), Earthquake of 26 August 1959”. *Second World Conference of Earthquake Engineering*, Tokyo, pp. 473-486.
- Field, E H y K H Jacob (1995), “A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(4), 1127-1143.
- Haskell, N A (1962a), “Radiation patterns of surface waves from point source in multi-layered medium”. *Bulletin of Seismological Society of America*, 54, 377-393.
- Haskell, N A (1962b), “Crustal reflection of plane P and SV waves”. *Journal of Geophysical Research*, 4751-4767. [DOI: 10.1029/JZ067i012p04751](https://doi.org/10.1029/JZ067i012p04751)
- Kawase, H, F J Sánchez-Sesma y S Matsushima (2011), “The optimal use of horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratios of earthquake motions for velocity structure inversions based on diffuse field theory for plane waves”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(5), 2001-2014. [DOI: 10.1785/0120100263](https://doi.org/10.1785/0120100263)
- Kawase, H, Y Mori y F Nagashima (2018), “Difference of horizontal to vertical spectral ratios of observed earthquakes and microtremors and its application to S wave velocity inversion based on the diffuse field concept”, *Earth, Planets and Space*, 70, 32. [DOI: 10.1186/s40623-017-0766-4](https://doi.org/10.1186/s40623-017-0766-4).
- Lermo, J y F J Chávez-García (1993), “Site effect evaluation using spectral ratios with only one station”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(5), 1574-1594.
- Lermo, J y F J Chavez-García (1994a), “Are microtremors useful in site response evaluation?”. *Bulletin of the Seismological Society of America* 84(5), 1350-1364.
- Lermo, J y F J Chavez-García (1994b), “Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 13, 413-423. [DOI: 10.1016/0267-7261\(94\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0267-7261(94)90012-4)

Marsal, R J (1961), “Behavior of sandy uniform soils during the Jaltipán Earthquake, México”. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, Francia, pp 229-233.

Martínez-González, J.A.(2015), “Validación del factor de amplificación de los coeficientes espectrales a partir de microtremores para fines de mapas sísmicos de intensidad”. *Tesis de Maestría*, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.  
<http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/7328>

Nakamura, Y (1989), “A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface”. *QR of RTRI 30-1*, February, pp. 25-33. <https://trid.trb.org/view/294184>

Ordaz, M y C Montoya (2013), Programa de cómputo DEGTRA, V9.3. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

PRODISIS v4.1 (2015), “Programa de Diseño Sísmico”, Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), Comisión Federal de Electricidad (CFE), Cuernavaca, Mor. México.  
<https://www2.ineel.mx/prodysis/es/prodysis.php>

Ramírez, A y V M Taboada (2000), “Casos historia de licuación en México”. *Memorias de la XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Oaxaca, México, pp. 353-357.

Reinoso, E, y M Ordaz (1999), “Spectral ratios for Mexico City from free-field recordings”, *Earthquake Spectra*, 15, 273-295. [DOI: 10.1193/1.1586041](https://doi.org/10.1193/1.1586041)

Sánchez-Sesma F J, R L Weaver, H Kawase, S Matsushima, F Luzón, y M Campillo (2011a), “Energy Partitions among elastic waves for dynamic surface loads in a semi-infinite solid”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(4), 1704-1709. [DOI: 10.1785/0120100196](https://doi.org/10.1785/0120100196).

Sánchez-Sesma, F J, M Rodríguez, U Iturrarán-Viveros, F Luzón, M Campillo, L Margerin, A García-Jerez, M Suárez, M A Santoyo y A Rodríguez-Castellanos (2011b), “A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium”, *Geophys. J. Int.*, 186, 221-225. [DOI: 10.1111/j.1365-246X.2011.05064](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05064).

Servicio Sismológico Nacional (SSN) (2017), “Reporte especial Sismo del día 7 de septiembre de 2017”.  
[http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX\\_rep\\_esp\\_20170907\\_Tehuantepec\\_M82.pdf](http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170907_Tehuantepec_M82.pdf)

Vargas, C, F Flores y R Ortiz (2016), “Evaluación de la vulnerabilidad a la licuación de arenas”. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C., Ciudad de México, México.

Vicitez, L y A Mosqueda (1970), “El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones de la región de Minatitlán-Coatzacoalcos y Pajaritos, Ver.” *Memorias de la V Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*. D.F. México.

Youd, T L and I M Idriss (1997), “Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, *Nat. Ctr. for Earthquake. Engrg. Res.*, State Univ. of New York at Buffalo. <http://www.buffalo.edu/mceer/catalog.host.html/content/shared/www/mceer/publications/NCEER-97-0022.detail.html>

Youd, T.L., I M Idriss, R D Andrus, I Arango, G Castro, J T Christian, R Dobry, W D L Finn, L F Harder, M E Hynes, K Ishihara, J Koester, S Liao, W F Marcuson III, G R Martin, J K Mitchell, Y Moriwaki, M S Power, P K Robertson, R Seed and K H Stokoe (2001). "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, ASCE, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127, 817-833. [DOI: 10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:10\(817\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:10(817))